UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA MARINHA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

ANA PAULA DE OLIVEIRA LUZ

MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS À OBRAS DE ENGENHARIA

NITERÓI - RJ
2016

ANA PAULA DE OLIVEIRA LUZ

MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS À OBRAS DE ENGENHARIA

Trabalho apresentado ao curso de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como parte da disciplina de Projeto Final II e requisito para obtenção para o título de Bacharel de Geofísica.

Orientador: Gilmar Vital Bueno

NITERÓI – RJ

2016

ANA PAULA DE OLIVEIRA LUZ

MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS À OBRAS DE ENGENHARIA

Trabalho apresentado ao curso de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como parte da disciplina de Projeto Final II e requisito para obtenção para o título de Bacharel de Geofísica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Gilmar Vital Bueno – LAGEMAR (UFF)

Camila Mansur Almeida

Prof. André Luiz Ferrari – LAGEMAR (UFF)

NITERÓI – RJ

2016

L979 Luz, Ana Paula de Oliveira

Métodos geofísicos aplicados à obras de engenharia / Ana Paula de Oliveira Luz. – Niterói : [s.n.], 2016.

99 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geofísica) – Universidade Federal Fluminense, 2016.

1.Geologia de engenharia. 2.Métodos geofísicos. 3.Obras de engenharia. 4.Geotecnia. I.Título.

CDD 624.151

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por estar presente em todos os momentos da minha vida. Obrigada Senhor por Seu sustento, principalmente nos momentos de dificuldade.

A minha mãe Andrea, que sempre esteve ao meu lado, segurando-me para não cair, guiando os meus passos. Agradeço a ela pela orientação, pela palavra amiga, por toda a contribuição neste trabalho e pela enorme paciência nos meus momentos de desespero. Você é minha melhor amiga, meu porto seguro.

Ao meu pai Alzemiro, que sempre me apoiou e me mostrou que é por meio do estudo que vencemos cada desafio e chegamos mais perto dos nossos sonhos.

Aos meus irmãos Gabriel e Bruno, por acreditarem em mim e me darem força nos momentos difíceis.

Um agradecimento especial ao professor e meu orientador Gilmar Bueno, pelas ideias, motivação, profissionalismo e por se mostrar um grande amigo.

A minha coorientadora, a geóloga Camila Mansur, por sua atenção e disponibilidade durante o trabalho de campo.

Ao meu namorado e grande amigo Gustavo Cruz, pelo companheirismo, paciência e incentivo nas horas mais difíceis.

Aos meus amigos e colegas da Universidade Federal Fluminense, principalmente Deborah Vidal, Lais Baroni, Gabriela Esteves e Thiago Araújo, que me acompanharam durante toda a caminhada.

A minha grande amiga de infância Luana, obrigada por demostrar que essa amizade é para sempre.

A todos os professores do Departamento de Geologia, que colaboraram para que eu chegasse até aqui.

Enfim, a todas outras pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho, porém, aqui não citadas com a devida importância, os meus sinceros agradecimentos.

“Quem vence alguém é vencedor, mas quem vence a si mesmo é invencível. “

Morihei Ueshiba

RESUMO

Acidentes em obras de engenharia são frequentemente atribuídos a imprevistos geológicos. Tal fato está relacionado a um desconhecimento relativo da geologia do subsolo no qual as obras serão implantadas. Este desconhecimento traduz o quadro de incertezas que permeia o ambiente geológico, responsável por comuns insucessos em obras de engenharia ou, até mesmo, pelo aumento do custo destas obras. Em função das dificuldades que o meio técnico encontra diante desses problemas, procura-se discutir a importância da investigação criteriosa do subsolo tanto para aumentar a segurança da obra, como para elaborar projetos construtivos cada vez mais adequados a cada realidade geológica/geotécnica local, diminuindo custos, tempo, riscos e prejuízos. Este trabalho faz uma abordagem dos principais métodos geofísicos sob o ponto de vista de suas aplicações em projetos de geotecnia. Discute-se as limitações e as potencialidades de cada um dos métodos abordados (sísmicos, elétricos e georadar). Após isso apresenta-se estudos de casos que demonstram a eficiência dos métodos geofísicos e a importância da interpretação integrada destes dados com informações diretas (sondagens).

Palavras-chave: Imprevistos geológicos | Geotecnia | obras de engenharia | prevenção | métodos geofísicos | métodos diretos.

ABSTRACT

Failures in engineering works are often attributed to geological contingencies. This fact is related to the lack of knowledge about the subsoil geology. This lack of knowledge reflects the uncertainty that permeates the geological environment, which is responsible for common engineering failures or even increased construction costs. Due to the difficulties that the technological environment encounters in the problems, it was sought to discuss the research criterion of the subsoil both to increase the safety of the work and to elaborate constructive projects adapted to each local geological/geotechnical reality, reducing costs, time, risks and disbursements. This work deals with the main geophysical methods from the point of view of their application in geotechnical projects. The limitations and potentialities of each of the methods discussed (seismic, electrical and GPR) are discussed. Examples of cases that demonstrate an assessment of the use of geophysical methods and integrated interpretation with direct information (surveys).

Keywords: Geological surveys | Geotechnics | engineering works | prevention | geophysical methods | direct informations.

Sumário

AGRADECIMENTOS IV

RESUMO VI

ABSTRACT VII

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 Objetivos 2

2 CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO 3

3 GEOLOGIA DE ENGENHARIA 6

3.1 Riscos Geológicos 6

3.2 Fenômenos e Desastres Naturais 7

3.3 Intemperismo em Maciços Rochosos 8

3.3.1 Intemperismo físico 8

3.3.2 Intemperismo químico 9

3.3.3 Intemperismo biológico 10

3.3.4 Interferência do homem no intemperismo 10

3.3.5 Efeitos do intemperismo de interesse geotécnico 10

3.4 Mecanismos de erosão em Maciços Rochosos 11

3.4.1 Clima 12

3.4.2 Cobertura Vegetal 13

3.4.3 Relevo 13

3.4.4 Tipos de solos 13

3.5 Propriedades das rochas aplicadas à Engenharia 14

3.5.1 Propriedades Físicas 15

3.5.2 Propriedades Químicas 18

3.5.3 Propriedades Mecânicas 18

3.5.4 Propriedades Geotécnicas 19
4 MÉTODOS DIRETOS PARA PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA 22
4.1 Prospecção Manual 22
4.2 Prospecção Mecânica 26
5 MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS À ENGENHARIA E GEOTECNIA 29
5.1 Introdução 29
5.2 Ensaios em furos de sondagem 30
5.3 Métodos Sísmicos 33
5.3.1 Lei de Snell 36
5.3.2 Sísmica de Reflexão 37
5.3.3 Sísmica de Refração 38
5.4 O Método da Eletrorresistividade (ER) 39
5.4.1 Princípios Básicos 40
5.4.2 Arranjo dos Eletrodos 41
5.4.3 Técnicas de campo 45
5.4.3.1 Sondagem Elétrica Vertical (SEV) 46
5.4.3.2 Caminhamento Elétrico (CE) 47
5.5 O Método GPR 49
6 CASOS E EXEMPLOS 53
6.1 O projeto de túneis 53
6.1.1 Condicionantes Geotécnicos 54
6.2 Apresentação do Caso 1: Canteiro de Construção para Implantação do BRT Niterói 56
6.2.1 Estudo Prático de Segurança 56
6.2.2 Estudo Geológico – Perfuração 56
6.2.2.1 Introdução 56
6.2.2.2 Método adotado 57

6.2.2.3 Sequência executiva 58
6.2.2.4 Classificação geológica 59
6.2.2.5 Classificação geológica-geotécnica 59
6.2.2.6 Tratamento de acordo com a classe mapeada 63
6.2.2.7 Instrumentação 64
6.2.2.8 Conclusão 64
6.3 Apresentação do Caso 2: Investigação de blocos de rochas e matacões 64
6.3.1 Introdução 65
6.3.2 Estudo com sondagem e as características geotécnicas 65
6.3.3 Método 66
6.3.4 Resultados obtidos 67
6.3.4.1 Caminhamento Elétrico - CE 67
6.3.4.2 Sondagem Elétrica Vertical – SEV 70
6.4 Apresentação do Caso 3: Investigação de cavidades em subsuperfície para obras rodoviárias 71
6.4.1 Introdução 71
6.4.2 Método 72
6.4.3 Resultados 73
6.5 Apresentação do Caso 4: Investigação de estabilidade de taludes 74
6.5.1 Introdução 74
6.5.2 Método 75
6.5.3 Resultados Obtidos 76
6.5.4 Conclusões 78
7 CONCLUSÕES 79
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 81

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Subdivisão do Sistema Orogênico Mantiqueira (Heilbron et al., 2004). ... 3

Figura 2-2: Mapa tectônico da Faixa Ribeira na região Sudeste do Brasil (Modificado de Heibron et al., 2008). ... 4

Figura 3-1: Fratura de uma rocha provocada pelo alívio de pressão ocorrido devido a remoção (Teixeira et al., 2004). ... 8

Figura 3-2: Impacto da água da chuva sobre o solo (Secretaria de Energia e Saneamento de São Paulo, 1989). ... 12

Figura 4-1: Escavação de poços para prospecção geotécnica (Ribeiro, 2014). ... 23

Figura 4-2: Método manual através da escavação de trincheiras (Ribeiro, 2014). ... 24

Figura 4-3: Tipos de trados para sondagens (Ribeiro, 2014). ... 25

Figura 4-4: Amostras de sondagens obtidas pela prospecção manual à trado (Ribeiro, 2014). ... 26

Figura 4-5: Tripé empregado na execução do ensaio SPT (Dantas Neto, 2008). ... 28

Figura 5-1: Métodos geofísicos utilizados na geotecnia. ... 30

Figura 5-2: Ensaio *downhole* utilizando martelo como fonte geradora de ondas e o sismógrafo para fazer o registro (Modificado de Dourado, 1984 apud IPT, 2012). .. 31

Figura 5-3: Ensaio de *crosshole* utilizando 3 furos (Gandolfo, 2016). ... 32

Figura 5-4: Ensaio em *crosshole* para captar ondas diretas entre a fonte e o geofone (seta azul) ao invés de captar as ondas que sofrem reflexão ou refração (seta vermelha) (IPT, 2012). ... 32

Figura 5-5: Resultados de um ensaio *crosshole* correlacionando com descrições de sondagem em uma área de arenitos (IPT, 2010 apud Gandolfo e Souza, 2012) ... 33

Figura 5-6: Representação das ondas (a) Onda P e (b) Onda S (Rocha, 2013). ... 34

Figura 5-7: Representação do raio incidente na interface de meios de diferentes velocidades e seus respectivos raios refletidos e refratados ... 36

Figura 5-8: Trajetórias dos raios diretos, refletido e refratado em um levantamento sísmico, considerando um meio de duas camadas horizontais ... 38

Figura 5-9: Esquema do Método de Eletrorresistividade usualmente utilizado em campo para determinação da diferença de potencial em um solo ao ser injetada uma corrente (Braga, 2016). ... 40

Figura 5-10: Eletrodos de corrente (A e B) e eletrodos de potencial (M e N) alinhados em configuração Schlumberger para determinação da resistividade (Amarante, 2014). 42

Figura 5-11: Eletrodos de corrente (A e B) e eletrodos de potencial (M e N) alinhados em configuração Wenner para determinação da resistividade (Amarante, 2014). ... 43

Figura 5-12: Esquema de plotagem do arranjo Wenner mostrando a rápida perda de cobertura com a profundidade (Gandolfo, 2007). 43

Figura 5-13: Eletrodos de corrente (A e B) e eletrodos de potencial (M e N) alinhados em configuração Dipolo - Dipolo para determinação da resistividade (Amarante, 2014). 44

Figura 5-14: Representação de uma aquisição utilizando cinco níveis de investigação através do arranjo Dipolo – Dipolo (Gandolfo, 2007). 45

Figura 5-15: Principais técnicas de campo utilizadas para mapeamento do subsolo (IPT, 2012). 45

Figura 5-16: Técnica da Sondagem Elétrica Vertical (Braga, 2016). 46

Figura 5-17: Forma de plotagem de dados para construção da seção de resistividade aparente, onde “n” representa os diferentes níveis de investigação (Hallof, 1957). . 48

Figura 5-18: Pseudo-Seção de resistividade elétrica aparente (ITP, 2012)..... 49

Figura 5-19: Princípio do método de GPR (IPT, 2012) 50

Figura 5-20: Exemplo de uma seção GPR com sua interpretação (abaixo). O refletor assinalado em amarelo corresponde ao fundo da lagoa, preenchida por sedimentos arenosos (IPT, 2006 apud Gandolfo e Souza, 2012). 51

Figura 6-1: Exemplos de estruturas geológicas encontradas em túneis. No lado esquerdo o túnel atravessa camadas de diferentes comportamentos geotécnicos. No lado direito o túnel encontra-se desenvolvido ao longo de um único tipo de camada. (Maragon, 1995). 54

Figura 6-2: Material de rocha muito alterada, de classe V, encontrada no túnel 7000. 57

Figura 6-3: Amostra do gnaisse facoidal encontrado no maciço. 60

Figura 6-4: Amostra do pegmatito encontrado no maciço. 60

Figura 6-5: Modelo de imagem elétrica e perfil geotécnico para a Seção 01 (Xavier e Xavier, 2011). 68

Figura 6-6: Modelo de imagem elétrica e perfil geotécnico para a Seção 02 (Xavier e Xavier, 2011). 69
Figura 6-7: Resultado da SEV 01 e sua Interpretação Geológica (Xavier e Xavier, 2011). 70
Figura 6-8: Cavidade na Rodovia BR-414/GO (Reis e Junior, 2006). 71
Figura 6-9: Computador portátil para a aquisição dos dados (Reis e Júnior, 2006). 72
Figura 6-10: Mapa Esquemático da localização dos nove perfis (esquerda) e o resultado do 1º perfil (Reis e Júnior, 2006). 73
Figura 6-11: Vista do local antes do escorregamento (esquerda) e depois do escorregamento (direita) (Xavier, 2008). 74
Figura 6-12: Localização das sondagens geofísicas; 6 Caminhamentos Elétricos e 2 Sondagens Elétrica Vertical (Xavier, 2008). 75
Figura 6-13: Imagem elétrica 2D do Caminhamento Elétrico CE 01 e sua devida interpetação geológica (Xavier, 2008). 77
Figura 6-14: Modelo geoelétrico para a SEV 01 (Xavier, 2008). 78

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Grau e alteração da rocha 11
Tabela 3-2: Grau de resistência à compressão simples (Maragon, 1995)..... 20
Tabela 3-3: Grau de consistência das rochas (Maragon, 1995) 21
Tabela 6-1: Maciços de rocha Classe I 61
Tabela 6-2: Maciços de rocha Classe II 61
Tabela 6-3: Maciços de rocha Classe III 62
Tabela 6-4: Maciços de rocha Classe IV..... 62
Tabela 6-5: Maciços de rocha Classe V..... 62
Tabela 6-6: Dados de Sondagens tipo SPT mostrando a profundidade do impermeável (Xavier e Xavier, 2011) 66

1 INTRODUÇÃO

Com o processo de urbanização descontrolada característico do século XXI cresce cada vez mais a necessidade de obras civis de elevada complexidade, principalmente nos setores de construção de rodovias, implantação de barragens, abertura de túneis, obtenção de água subterrânea, construção de moradias em áreas de encostas, dentre outras.

Diante de tanta complexidade é comum o meio técnico ser surpreendido por notícias ou relatos de acidentes em obras de engenharia, cuja origem está relacionada principalmente ao relativo desconhecimento do ambiente geológico em que a obra é inserida.

É nesse contexto que a Geofísica se destaca como uma excelente ferramenta para diagnóstico do subsolo e para análises geotécnicas para assim, solucionar os problemas de Engenharia e garantir maior segurança nas obras. A Geofísica Aplicada à Engenharia Civil faz o emprego de métodos geofísicos de baixo custo e rapidez na execução e nos resultados.

No entanto, o erro na escolha dos métodos ou a utilização inadequada destes, pode levar a erros graves na definição final do modelo da área estudada. Portanto, a escolha do método geofísico constitui o primeiro passo para o sucesso ou fracasso de uma obra como um todo.

É necessário que, na prática profissional, geólogos, geofísicos e engenheiros civis trabalhem de forma conjunta e complementar. Cabe ao geólogo/geofísico realizar levantamentos e fazer toda a investigação necessária para apresentar ao engenheiro a natureza dos terrenos sobre os quais as obras serão implementadas. Após o estudo realizado, cabe ao engenheiro civil projetar e construir as obras respeitando os levantamentos geofísicos e solicitar, quando necessário, novos dados.

O foco deste trabalho é apresentar os possíveis métodos geofísicos utilizados em obras de engenharia e identificar as condições de aplicabilidade deles, os requisitos para bons resultados e possibilidade de combinação de diferentes métodos, de modo que o engenheiro interessado em utilizar as técnicas possa definir um programa de investigação que atenda corretamente às necessidades de seu projeto.

1.1 Objetivos

O principal objetivo e escopo do trabalho proposto é apresentar e discutir conceitos de geologia e métodos geofísicos aplicáveis em obras de engenharia em ambiente urbano. Estes conceitos garantem uma obra com mais segurança, menos imprevistos geológicos e diminuição de custos, ou seja, a utilização da geofísica unida com abordagens geológicas pode minimizar vários problemas de engenharia. Pretende-se também mostrar a eficiência desses métodos na prática, através da apresentação de alguns estudos de casos. Propõe-se, então, inicialmente, algumas metas necessárias a serem cumpridas para alcançar o objetivo maior da pesquisa:

(a) Levantamento bibliográfico sobre as características referente às áreas que serão estudadas, dando ênfase às características geológicas e geotécnicas.

(b) Revisão de conceitos de geologia e propriedades geotécnicas utilizados na área de Engenharia.

(c) Definição das técnicas geofísicas e qual a relevância do emprego das mesmas na identificação de características geológico-geotécnicas de um dado terreno.

(d) Apresentação de estudos de casos que demostram a importância da utilização de métodos geofísicos e da interpretação integrada com informações diretas (sondagens).

As pesquisas foram realizadas por meio de artigos científicos, trabalhos (de graduação, de especialização, de mestrado e de doutorado) e pelos livros Geologia Aplicada à Engenharia, de Nivaldo José Chissi (Chissi, 1987) e Geofísica de Exploração (Kearey et al., 2009), traduzido por Maria Cristina Moreira Coelho.

Os estudos de casos históricos foram feitos com base em três trabalhos: Xavier e Xavier (2011) “Geofísica Elétrica Aplicada a Geotecnia para Investigação de blocos de rocha e matacões”; Reis e Júnior (2006) “Investigação de cavidades em subsuperfície para obras rodoviárias”; Xavier (2008) “Geofísica Elétrica aplicada a Geotecnia para investigação de estabilidade de taludes”; por fim, uma saída de campo (Túnel Charitas-Cafubá).

2 CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO

A região onde foi realizada a saída de campo localizada no município de Niterói está inserida no contexto geológico do Segmento Central da Faixa Ribeira, subdivisão da Província Mantiqueira.

A Província da Mantiqueira constitui um extenso cinturão de rochas que foi instalado na borda leste do Cráton de São Francisco/Rio de La Plata no final do Neoproterizóico/ início do Paleozóico (Delgado et al., 2003) (Figura 2.1).

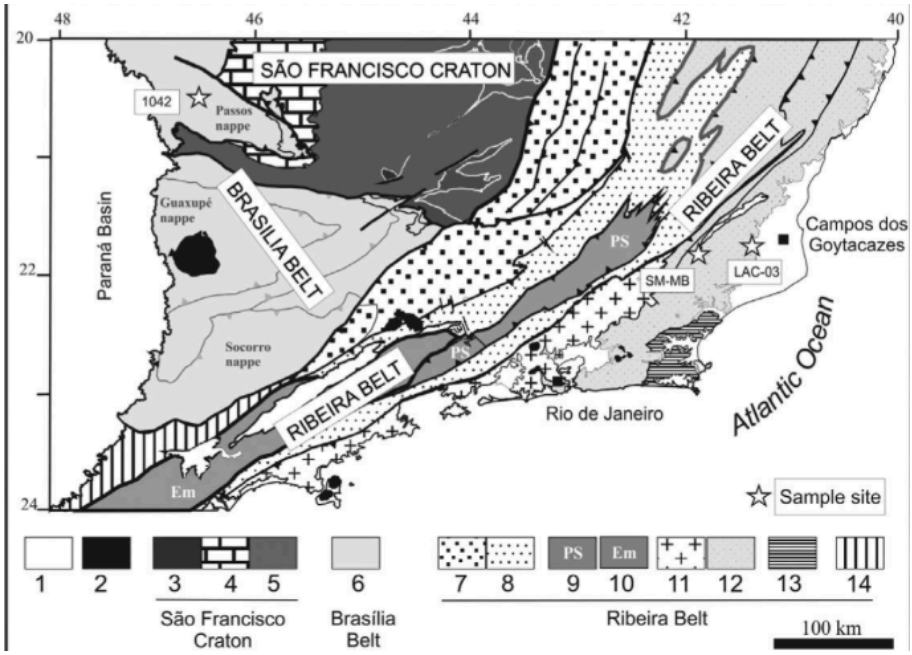


Figura 2-1: Subdivisão do Sistema Orogênico Mantiqueira (Heilbron et al., 2004).

Tal província estrutural é constituída pela Faixa Ribeira (na parte central – onde localiza-se o Rio de Janeiro) (Figura 2.2), que se caracteriza por ser um complexo cinturão de dobramentos e empurrões de direção NE-SW formada durante o fim do Pré-Cambriano e início do Paleozóico na colisão entre os crátons do Congo e do São Francisco. Esta possui aproximadamente 1400km de extensão ao longo do litoral e da costa sudeste do Brasil (Cordani et al., 1972; Almeida et al., 1973).

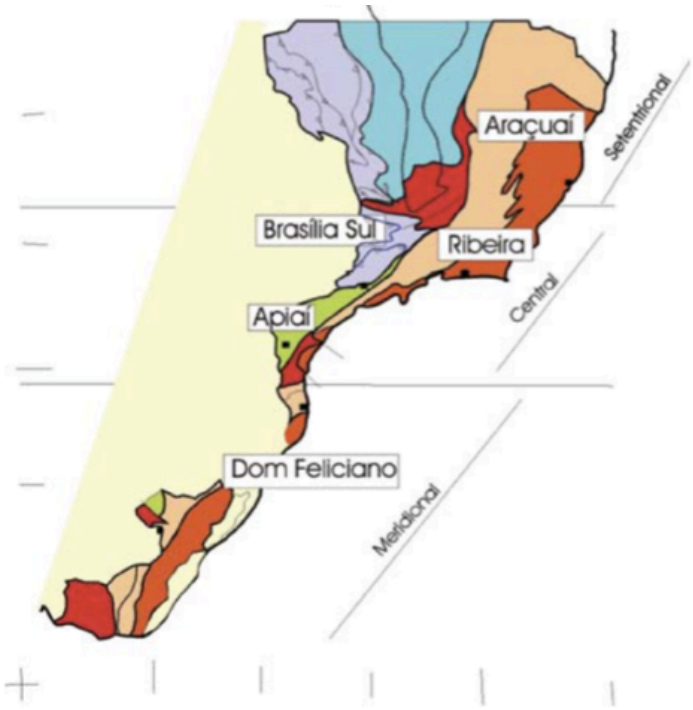


Figura 2-2: Mapa tectônico da Faixa Ribeira na região Sudeste do Brasil (Modificado de Heibron et al., 2008).

Esta porção do estado do Rio de Janeiro é constituída principalmente por ortognaisses, migmatitos e granitóides sin-, tardi- e pós-tectônicos, que na área é representado por rochas granitoides bastante deformadas por um tectonismo dúctil/rúptil (Zona de Cisalhamento Niterói de Hippert, 1990) que afetou as rochas graníticas em quase todo o município de Niterói. Essa zona de deformação é representada por uma faixa de rochas miloníticas com mais de 10km de largura, do bairro da Armação às imediações de Itaipu (Ferrari et al., 2004).

A síntese das unidades litológicas na região de Niterói é apresentada e descrita no trabalho de Ferrari et al. (1982), a saber:

Unidade Angelim – Ocorre a ocidente de Niterói ao lado norte da Ilha da Conceição. É constituída de gnaisses homogêneos, com textura porfiroblástica e foliação incipiente ou mediana. A rocha possui coloração cinza escura, devido ao teor de cerca de 10% de biotita. São notados também, domínios heterogênios migmáticos, com frequentes venulações de material quartzo-feldspático, exibindo cristais de granada.

Unidade Catalunha – Está presente em Gragoatá, São Domingos e morro da Boa Vista e possui formato de cunha no domínio do gnaisse facoidal. Está exposta em

afloramentos bastante intemperizados em contatos abruptos com o gnaisse facoidal envolvente. Ela é representada por um gnaisse cinza escuro, bem foliado, bandado em faixas de composições minerais, texturais e cores diferentes. A rocha mostra efeitos da tectônica, especialmente espelhada nos grãos de quartzo estirados.

Unidade Gnaisse Facoidal – É a unidade que predomina no substrato rochoso do município de Niterói e forma quase todos os maciços rochosos junto ao mar. Para o interior estão bem mais alterados, embora seja de fácil identificação. É uma rocha homogênea, constituída de grãos grosseiros de coloração cinza clara a rosada, com megafeldspatos potássicos, geralmente microclina, comumente de 3 e 5 cm, podendo atingir até 15 cm de eixo maior. A matriz é composta essencialmente de plagioclásio, quartzo e biotita e, às vezes, granada.

3 GEOLOGIA DE ENGENHARIA

No que diz respeito ao assunto abordado em questão, será apresentado a seguir alguns conceitos de geologia bastante utilizados no contexto de uma obra e o esclarecimento de termos técnicos de importância fundamental para a padronização de terminologias que serão utilizadas neste trabalho.

3.1 Riscos Geológicos

Risco é definido pelo Glossário de Defesa Civil (CASTRO A. L. C., 1998) como: “a probabilidade de ocorrência de um acidente, desastre ou evento adverso, relacionado com a intensidade dos danos ou perda, resultantes dos mesmos. Dessa forma, é uma medida de dano potencial ou prejuízo econômico expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência do fenômeno e de intensidade das consequências previsíveis”.

Os riscos geológicos sempre estarão presentes em qualquer tipo de obra em maior ou menor grau dependendo de inúmeras variáveis, entre as quais as mais importantes são a complexidade geológica, a qualidade do programa de investigação e o tipo de obra (Pastore, 2009).

Muitos autores apresentam também uma equação para uma melhor análise do risco, utilizando dois parâmetros principais: (P) a possibilidade de ocorrência de um evento, e (C) que são as consequências sociais e/ou econômicas potenciais. O risco (R) portanto corresponde à:

$$R = P \, . \, C \tag{3.1}$$

Os riscos ou imprevistos geológicos podem estar predominantemente relacionados com a geodinâmica interna e externa. A geodinâmica interna consiste em erupções vulcânicas, fenômenos associados a atividade sísmica, ruptura superficial, inundação por subsidência, escorregamento de terrenos, tsunamis, entre outros. Os deslizamentos de terrenos, queda de blocos, avalanches de lama, assoreamentos, inundações, consistem na dinâmica externa.

As principais consequências do risco geológico nas obras são a ocorrência de acidentes de pequenas ou graves proporções com perdas materiais e humanas, os

custos adicionais devido à necessidade de modificações no projeto básico, com por exemplo, acréscimos nos quantitativos de tratamentos de taludes e sistemas de suporte de túneis.

3.2 Fenômenos e Desastres Naturais

Marcelino (2008) apresenta em seu trabalho, um expressivo esclarecimento sobre desastres naturais, segundo Tobin G.A.; Montz B.E., (1997):

> Os desastres naturais podem ser conceituados, de forma simplificada, como o resultado do impacto de um fenômeno natural extremo ou intenso sobre um sistema social, causando sérios danos e prejuízos que excede a capacidade dos afetados em conviver com o impacto. Tobin G.A.; Montz B.E., (1997).

Eventualmente ocorrem na natureza fenômenos como terremotos, tsunamis, furacões, tempestades, inundações e deslizamentos de terra, que são classificados como eventos naturais. Além da intensidade desses fenômenos naturais, com o acelerado processo de urbanização verificado nas últimas décadas no Brasil, ocorreu o crescimento das cidades, muitas vezes em áreas impróprias à ocupação, contribuindo para um aumento as situações de risco e, portanto, uma maior frequência e intensidade de desastres, chamados de desastres naturais induzidos.

Avalia-se que, no Brasil, os desastres naturais mais frequentes são as inundações, deslizamentos de terra, erosão e quebra e rolamento de blocos de rocha. Estes fenômenos são influenciados por características regionais, tais como: rocha, solo, topografia, vegetação, condições meteorológicas, etc. No entanto, um fenômeno natural só é caracterizado como desastre quando ocorrem em locais onde os seres humanos vivem, resultando em danos (materiais e humanos) e prejuízos (socioeconômicos) (Kobiyama et al., 2006).

Nesse sentido, pode-se dizer que a ocorrência de um fenômeno natural não necessariamente irá provocar um evento desastroso. O que irá caracterizá-lo como tal é se atingirem uma área habitada, que resultará em danos materiais e vitimando pessoas.

3.3 Intemperismo em Maciços Rochosos

O intemperismo é muito importante de ser estudado no contexto de obras de engenharia pois ele afeta profundamente as rochas dos maciços. Os maciços intemperizados possuem solos espessos em seus topos, que são locais onde obras geotécnicas, como contenção de encosta e túneis, serão instaladas.

Por definição, a ação intempérica é o processo que ocorre nas rochas fazendo com que elas sejam desintegradas quando expostas na superfície da crosta. O produto gerado dessa alteração são as argilas, o processo inicial de formação de solos e substâncias dissolvidas. É importante enfatizar que no processo de intemperismo não há remoção dessas substâncias dissolvidas, quando isso acontece pode-se falar em erosão.

3.3.1 Intemperismo físico

É o conjunto de processos que leva a desintegração e fragmentação da rocha sólida por processos mecânicos, sem que haja alteração química da sua composição. Segundo Press et al. (2006), a fragmentação pode ocorrer por diversas causas:

a) Zonas naturais de fraqueza: As rochas possuem zonas naturais de fraqueza que com a remoção de camadas sobrejacentes, elas não só ficam expostas na superfície, mas também liberam tensões ali existentes gerando um processo de intemperismo (Figura 3.1).

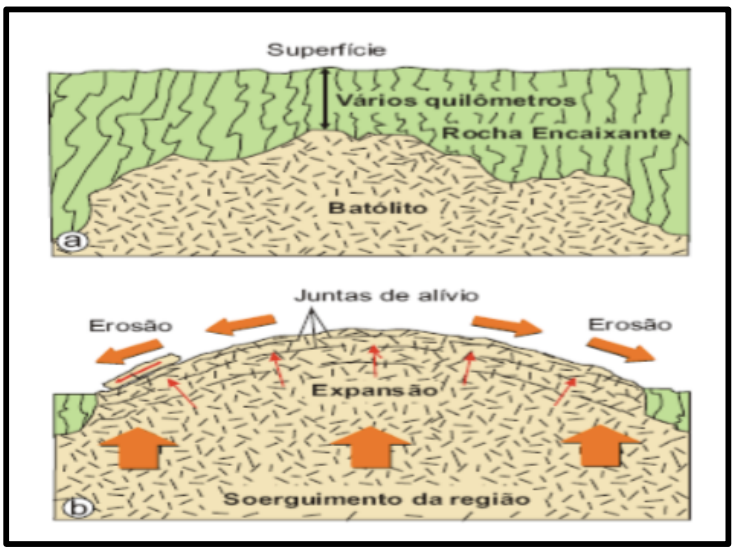


Figura 3-1: Fratura de uma rocha provocada pelo alívio de pressão ocorrido devido a remoção (Teixeira et al., 2004).

Um exemplo onde esse raciocínio é utilizado é no processo de abertura de túneis. Por meio da Lei de Hook é possível medir a tensão da rocha devido ao seu estado de deformação. Esta lei física relaciona a tensão com a deformação utilizando a fórmula $\zeta = \varepsilon . E$ (E = módulo de elasticidade; ζ = tensão; ε = extensão ou deformação linear). Com isso, pode-se perceber que a deformação da rocha é proporcional à carga existente sobre ela e inversamente proporcional ao módulo de elasticidade da rocha. Quando a carga sobre a rocha é liberada ela expande (Abreu, 2010).

b) Atividades de organismos: Algas, bactérias, vermes e outros provocam microfraturas quando escavam ou se movimentam nas fraturas da rocha. Ou seja, estes organismos aceleram ainda mais a abertura das fraturas.

c) Cristalização de minerais: Determinadas soluções retidas no interior das rochas podem aumentar ainda mais as fraturas, devido ao aumento de tensão quando estas se cristalizam. Segundo Press et al. (2006), esse fenômeno é mais comum em regiões áridas, onde as substâncias resultantes do intemperismo químico podem cristalizar quando a solução evapora. Fato relevante para regiões costeiras como a do Estado do Rio de Janeiro.

d) Variação de temperatura: Durante a noite as temperaturas são inferiores as da manhã. Com isso, o ciclo de alternância de calor e frio pode provocar a fragmentação das rochas. O aquecimento na superfície da rocha gera um aumento de volume no sentido perpendicular à superfície do terreno, e em sentido paralelo ao terreno, leva à criação de tensões, que provocam fraturamento, da mesma maneira mecânica que a outra.

3.3.2 Intemperismo químico

Neste tipo de intemperismo a rocha altera-se quimicamente e sofre decomposição quando seus constituintes reagem com o ar e a água. A variação do intemperismo químico é de acordo com os minerais que compõe a rocha.

Os minerais alteram-se em diferentes taxas, de acordo com sua estabilidade química. A estabilidade química é a medida de tendência que uma substância tem de resistir a uma certa forma química, sem se transformar em uma substância química diferente (Press et al., 2006). De forma geral, os minerais de silicatos que

compõem a rocha tendem a gerar argilominerais no estado final da decomposição química, ao contrário do quartzo, que é mais resistente a estas mudanças.

3.3.3 Intemperismo biológico

É caracterizado por rochas que perdem alguns de seus nutrientes essenciais para organismos vivos e plantas que crescem em sua superfície. Além disso, as plantas podem provocar o intemperismo mecânico quando suas raízes penetram, de forma profunda na rocha, provocando fendas.

3.3.4 Interferência do homem no intemperismo

O homem, sem dúvidas, é um dos grandes agentes que provocam a degradação de rochas especialmente para obras de engenharia civil. A cada fratura gerada irá favorecer o intemperismo. Segundo Tominaga, Santoro & DoAmaral (2009), as formas de intervenção humana que propiciam a erosão acelerada e que são denominadas de condicionantes antrópicos são: desmatamento, movimento de terra, concentração do escoamento superficial das águas e o uso inadequado dos solos urbanos e agrícolas.

3.3.5 Efeitos do intemperismo de interesse geotécnico

a) Relação entre intemperismo e a resistência: o que garante a resistência da rocha é o seu grau de sanidade, principalmente para as ígneas e metamórficas, sendo possível seu uso para qualquer tipo de obra. A importância dos materiais rochosos em construção se dá principalmente por: diminuição de resistência, variação nas características mecânicas de deformação e deformabilidade, variação na porosidade e permeabilidade e, diminuição nas características de aderência e adesão (Abreu, 2010).

A classificação do grau de alteração utiliza os seguintes termos: rocha praticamente sã, rocha alterada e rocha muito alterada (Chiossi,1979). A comissão para mapeamento geotécnico da AIGE propõe a classificação conforme mostra a tabela 3.1 abaixo:

Tabela 3-1: Grau e alteração da rocha

Classe	Grau de alteração	Termo
1	0-25	Fracamente alterado
2	25-50	Moderadamente alterado
3	50-75	Altamente alterado
4	75-100	Completamente alterado
5	100	Solo residual alterado

b) Durabilidade das rochas: é função da velocidade de alteração sofrida pelo corpo rochoso. O clima é fundamental para o processo de alteração de uma rocha, mesmo em profundidade. Exemplos são granitos de países tropicais que em poucos anos são alterados, enquanto que rochas mobilizadas por geleiras continuam praticamente sãs (Hunt, 1972). As rochas basálticas do Brasil precisam ser bem estudadas antes de sua utilização em uma obra, pois podem não suportar as intempéries de uma geração (Abreu, 2010).

3.4 Mecanismos de erosão em Maciços Rochosos

O processo de erosão é um processo natural no qual consiste na ação simultânea de um conjunto de fatores que gera a desagregação e o transporte de partículas e fragmentos de rocha ou do solo sobre a superfície terrestre. Os principais agentes de erosão são as águas das chuvas, rios, mares, geleiras e ventos. Dentre esses, há destaque para as águas pluviais, por propiciarem o escoamento superficial e o transporte de material inconsolidado (Oliveira, 2010).

Além dos principais agentes, pode-se também mencionar as atividades antrópicas que, em grande parte, aceleram os mecanismos de erosão e causam grandes prejuízos socioeconômicos. Em decorrência da expansão das cidades houve grande exposição de solos para que obras fossem implantadas. Com a ausência de proteção da cobertura vegetal e das camadas superficiais do solo desses terrenos, eles tornaram-se vulneráveis à ação das chuvas e do escoamento superficial das águas pluviais, propiciando a erosão acelerada. Associado a isso, a escolha inadequada de locais geotecnicamente propícios, falta de infraestrutura urbana e sistemas de drenagem mal concebidos e mal executados aceleram a ocorrência dos processos erosivos (Santoro, 2000).

De acordo com Tominaga, et. al (2009), existem quatro fatores naturais que influenciam na erosão:

3.4.1 Clima

A precipitação é o fator climático mais relevante. A principal influência da precipitação no processo erosivo não é apenas pela quantidade anual de chuva, mas principalmente pela distribuição das chuvas durante o ano, mais ou menos regular, no tempo e no espaço, e sua intensidade (Santoro, 1991).

Durante fortes chuvas, as gotas de água penetram no terreno de forma intensa e desprendem as partículas do solo. Quando não há vegetação mais densa no terreno, não há proteção e nem retenção ao impacto da chuva, fazendo com que muitas partículas sejam transportadas pela água (Figura 3.2).

Figura 3-2: Impacto da água da chuva sobre o solo (Secretaria de Energia e Saneamento de São Paulo, 1989).

No Estado do Rio de Janeiro as chuvas mais intensas acontecem no verão. Há recentes episódios de desastres naturais associados a chuvas extremas e inesperadas durante esse período, em que são frequentes os temporais e pancadas de chuvas fortes, ocorrendo uma aceleração dos processos erosivos, nos quais podem gerar situações de risco ao atingirem áreas urbanas, com danos a moradias e vias de acesso.

3.4.2 Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal é de suma importância contra a aceleração dos processos erosivos pois agem como uma proteção e defesa natural do terreno.

Em regiões com cobertura vegetal a água das chuvas não irá impactar o terreno pois, antes de chegar ao solo, a cobertura vegetal irá amortecer a queda das gotas ou poderá acontecer até sua evaporação antes destas chegarem ao solo.

Em casos onde o terreno é ausente de vegetação, o impacto da chuva faz com que as partículas dos solos se desprendam e sejam facilmente transportadas pelo escoamento superficial, que por sua vez é facilitado devido à falta do atrito da vegetação no terreno, agravando a erosão. Além disso, a vegetação, ao se decompor, adiciona matéria orgânica e húmus, melhorando a porosidade e a capacidade de retenção de água no solo (Bertoni; Neto,1990).

3.4.3 Relevo

Este fator está relacionado a topografia e declividade do terreno, onde a gravidade é um importante agente nesse tipo de mecanismo de erosão. A medida em que a declividade é mais acentuada, maior será o volume de água a descer pela encosta, aumentando assim, a velocidade do escoamento superficial. Em locais onde a declividade é mais suave ocorre a infiltração da água no solo ao invés do escoamento superficial, reduzindo, portanto, o efeito erosivo.

A infiltração é o movimento da água para dentro da superfície do solo. Quanto maior sua velocidade, menor a intensidade de enxurrada na superfície. A velocidade máxima de infiltração ocorre no início e geralmente decresce rapidamente. Se a chuva continua, a velocidade de infiltração gradualmente aproxima de um valor mínimo, determinado pela velocidade com que a água pode entrar na camada superficial e pela velocidade com que ela pode penetrar através do perfil do solo.

3.4.4 Tipos de solos

Os diferentes tipos de solos apresentam capacidade variada em resistir à ação dos agentes erosivos, de acordo com suas propriedades físicas, químicas e biológicas.

Permeabilidade, densidade, estrutura e textura constituem as propriedades físicas. A textura está relacionada ao tamanho das partículas, e é um dos fatores

que influenciam na maior ou menor quantidade de solo arrastado pela erosão. O solo arenoso com espaços porosos grandes, por exemplo, absorve toda água durante uma chuva de pouca intensidade, não havendo, portanto, nenhum dano. Entretanto, como possui baixa proporção de partículas argilosas que atuam como uma ligação de partículas grandes, pequena quantidade de enxurrada que escorre na sua superfície pode arrastar grande quantidade de solo. Já no solo argiloso, com espaços porosos bem menores, a penetração da água é reduzida, escorrendo mais na superfície. No entanto, a força de coesão das partículas é maior, o que faz aumentar a resistência à erosão.

A profundidade do solo influencia na infiltração da água. Nos solos pouco profundos, de acordo com sua permeabilidade, a água encontra uma barreira intransponível na rocha matriz que ocorre a pequena profundidade, a qual sendo impermeável fará com que a água se acumule no perfil, saturando-o rapidamente. Isto provocará o aumento rápido escoamento superficial e, consequentemente, o incremento da ação erosiva da chuva (Tominaga, et. al, 2009).

A permeabilidade também influencia no processo erosivo. Baixas permeabilidades provocam aumento do escoamento superficial. No entanto, uma permeabilidade muito elevada pode ter também um efeito prejudicial, pois causa percolação excessiva provocando a erosão vertical, que é a lixiviação (transporte) das partículas menores do solo para as camadas inferiores (Tominaga, et. al, 2009).

No caso da região Sudeste do Brasil, ocorre a predominância de solos com baixa suscetibilidade aos processos erosivos. Entretanto, 40% da região apresenta terras muito susceptíveis à erosão, em decorrência de relevos mais acidentados e/ou a solos com elevados conteúdos de areia.

3.5 Propriedades das rochas aplicadas à Engenharia

A rocha ocupa um importante papel nas construções devido suas altas qualidades de durabilidade, resistência e baixo custo, já que se encontra disponível na natureza.

Em decorrência do fato de ocupar grandes volumes, e com o objetivo de não encarecer o transporte, a rocha deve ser buscada próximo ao local onde será realizada a obra. Com isso, o Engenheiro terá a sua disposição não exatamente o material de que gostaria, e sim aquele disponível (Maragon, 1995).

A análise do comportamento das rochas pode ser feita de forma direta, observando-as em obras que já foram realizadas, como por exemplo os monumentos históricos que são utilizados para avaliar intemperismo, ou então, de forma indireta submetendo-as a experiências ou ensaios em laboratórios.

Segundo Maragon (1995), as propriedades estudadas que visam a caracterização e classificação das rochas são:

- Físicas
- Químicas
- Mecânicas
- Geotécnica

3.5.1 Propriedades Físicas

Cor

É uma propriedade fraca para classificar uma rocha devido a sua grande variabilidade em uma mesma amostra. A sua classificação pode ser monócromas - a rocha possui uma única coloração, uniformemente distribuída ou polícromas - quando a rocha é formada de mais cores.

Peso especifico

O peso específico (γ) é o peso da unidade de volume da rocha. Sua relação é dada por:

$$\gamma = \frac{W}{V} \tag{3.2}$$

W = Peso total da amostra de rocha

V= Volume total da amostra de rocha

O peso especifico pode ser aparente, quando não é descontado os vazios (poros) na sua determinação, ou real, onde considera-se somente o volume de rocha.

Porosidade

Consiste na razão entre o volume de vazios de uma amostra de rocha e o seu volume total.

$$n = \frac{Vv}{V} \tag{3.3}$$

Normalmente é expressa em percentagem, considerando-se para as rochas 10% como um valor médio, 5% um valor baixo e 15% um valor alto.

A porosidade possui relação com a permeabilidade (quanto maior a porosidade maior será a permeabilidade) e com a resistência (quanto maior a porosidade maior será a resistência à compressão).

A maior ou menor porosidade de uma rocha é dada em função da sua classificação. Rochas sedimentares possuem maior porosidade; rochas magmáticas possuem baixa porosidade, sendo as extrusivas um pouco mais porosas do que as intrusivas; rochas metamórficas têm baixa porosidade (de acordo com o grau de metamorfismo).

Permeabilidade

É a propriedade da rocha que está relacionada com a maior ou menor resistência que ela oferece à percolação da água. Rochas sedimentares apresentam permeabilidade elevada, ao contrário das rochas magmáticas e metamórficas.

A permeabilidade pode ser primária, que existe desde a formação da rocha, ou secundária, que ocorre devido a lixiviação ou dissolução de componentes mineralógicos (Chiossi, 1979).

Em comparação com a dos solos, a permeabilidade das rochas é geralmente muito baixa. O seu valor cresce sensivelmente com a fissuração e o grau de alteração. O nível de anisotropia[1] da permeabilidade depende da orientação preferencial das fissuras.

[1] Condição de variabilidade de propriedades físicas e mecânicas de um corpo rochoso ou mineral segundo direções diferentes, como por exemplo, a resistência à compressão simples ou a variação da velocidade de propagação de ondas sísmicas em massas rochosas estratificadas segundo diferentes direções.

Absorção

É a propriedade pela qual certa quantidade de líquido é capaz de ocupar os vazios de uma rocha ou parte destes vazios (ação física).

$$Ca = \frac{(Pa - Ps)}{Ps} \cdot 100 \qquad (3.4)$$

Pa = Peso após longa imersão

Ps = Peso seco

Dureza

Consiste em uma propriedade de difícil determinação pois as rochas são formadas por vários tipos de minerais que apresentam diferentes durezas.

Há três estágios de dureza: Moles - riscável pela unha e fácil pelo canivete, Médias - riscável pelo canivete e Duras - difícil pelo canivete ou não riscável.

Deformabilidade

A deformabilidade é um dos parâmetros mais importantes no que diz respeito ao comportamento dos maciços rochosos.

A necessidade deste tipo de análise é refletida em obras como barragens, onde o recalque da fundação devido ao peso próprio da barragem vai depender dos parâmetros de deformabilidade da fundação. Em projetos de túneis, o conhecimento da expansão ou convergência da cavidade permite estabelecer o suporte adequado (Guerra, 2011).

Deformabilidade consiste na propriedade que a rocha tem para alterar sua forma como resposta à ação de esforços. Dependendo da intensidade das forças e das características mecânicas da rocha, a deformação será permanente ou elástica. Neste último caso o corpo recupera sua forma original quando as forças aplicadas deixam de agir (Vallejo et al., 2002 apud Silva 2008).

A determinação desta propriedade em um maciço rochoso pode ser feita por meios diretos e indiretos. No primeiro, estão incluídos os ensaios *in situ* e no segundo, os métodos geofísicos associados a uma série de correlações empíricas envolvendo semelhanças com experimentos consagrados (Silva 2008).

3.5.2 Propriedades Químicas

Composição Química

A determinação da composição química de uma rocha não constitui um elemento suficiente para defini-la. É necessário analisar outra propriedade. A composição química de uma mesma rocha pode variar muito de uma amostra para outra.

Reatividade

Uma determinada rocha contém elementos reativos ou não inerte, quando esses elementos químicos são capazes de reagir ao entrar em contato com outros compostos. A água fluindo para dentro de um túnel e contendo sulfato de cálcio pode atacar o concreto de revestimento, por exemplo.

Durabilidade

É a resistência da rocha aos processos de alteração e fragmentação sendo também conhecida por alterabilidade. O contato da rocha com a água e o ar, muitas vezes através de obras de engenharia civil como escavações por exemplo, pode ocasionar a degradação das suas características mecânicas.

A durabilidade de uma rocha interessa no que diz respeito ao seu emprego como material de construção, uma vez que se espera deste material uma permanência de suas diversas propriedades.

3.5.3 Propriedades Mecânicas

Resistência à compressão

É obtida em laboratório por meio de ensaios de compressão simples em corpos de prova cilíndricos (relação entre altura/diâmetro > 2) ou cúbicos. Apresentam variações em função dos constituintes mineralógicos das rochas, fissuramento, umidade, leitos de estratificação e xistosidade.

Quanto mais forte for o ligamento entre os cristais, maior será a resistência à compressão. Os corpos de prova com compressão perpendicular aos planos de estratificação apresentam maior resistência à compressão.

Resistência ao choque

É a resistência que uma rocha oferece ao impacto de um peso que cai de uma certa altura.

Resistência ao desgaste

É a resistência que a rocha apresenta quando submetida a atrito mútuo de seus fragmentos.

Resistência ao corte

É a resistência apresentada por uma rocha para se deixar cortar em superfícies lisas. Dependendo da disposição dos minerais em uma determinada rocha, ela pode apresentar menor ou maior dificuldade ao corte.

Comportamento ante a Britagem

Resistência à britagem é a propriedade da rocha em apresentar maior dificuldade de se fragmentar, quando está submetida ao processo de britagem.

É medido pela percentagem de material fragmentado abaixo de uma certa dimensão, quando submetida à compressão em máquinas padronizadas.

3.5.4 Propriedades Geotécnicas

A reunião de parâmetros que serão apresentados (grau de alteração; grau de resistência à compressão simples; grau de consistência; grau de fraturamento) expressa a caracterização geotécnica da rocha.

Grau de alteração

Pode-se considerar três graus de alteração: rocha praticamente sã, alterada e muito alterada. Tal número de graus prende-se ao fato de que o estabelecimento de limites é muito subjetivo e o emprego de maior número de graus não seria prático.

Grau de Resistência à Compressão Simples

Representa um parâmetro que tem tido grande aceitação no meio geotécnico. É relativamente fácil de se obter, com reduzido número de corpos de prova.

Na tabela a seguir (tabela 3.2), as rochas são subdivididas em cinco níveis de resistência à compressão.

Tabela 3-2: Grau de resistência à compressão simples (Maragon, 1995)

Rocha	Resistência (Kg/cm2)
Muito resistente	>1200
Resistente	1200 - 600
Pouco resistente	600 - 300
Branda	300 - 100
Muito branda	<100

Grau de Consistência

Este parâmetro está relacionado a resistência ao impacto (tenacidade), resistência ao risco (dureza) e friabilidade. As rochas são assim divididas em quatro níveis de consistência (Tabela 3.3):

Tabela 3-3: Grau de consistência das rochas (Maragon, 1995)

Rocha	Características
Muito consistente	quebra com dificuldade ao golpe do martelo
Consistente	• o fragmento possui bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço. • quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo. • o fragmento possui bordas cortantes que podem ser abatidas pelo corte com lâmina de aço.
Quebradiça	• superfície riscável por lâmina de aço. • quebra facilmente ao golpe do martelo.
Friável	• as bordas do fragmento podem ser quebradas pela pressão dos dedos. • a lâmina de aço provoca um sulco acentuado na superfície do fragmento. • esfarela ao golpe do martelo. • desagrega sob pressão dos dedos.

Grau de Fraturamento

O grau de faturamento não se aplica a amostras de rochas, e sim ao maciço rochoso e é normalmente apresentado em número de fraturas por metro linear, em sondagens ou em paredes de escavação, ao longo de uma dada direção.

Consideram-se apenas as fraturas originais e não as provocadas pela própria perfuração ou escavação.

4 MÉTODOS DIRETOS PARA PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA

A prospecção geotécnica preliminar deverá fornecer dados suficientes para permitir a localização das estruturas principais do projeto, fazer uma estimativa de custos, bem como definir a viabilidade técnica e econômica da obra. Deve-se estudar com muito detalhe acerca da espessura das camadas que são interessadas pela construção, procedendo-se à coleta de amostras para ensaios de laboratórios a fim de determinar as propriedades que permitam estimar o comportamento dos solos. Caso não haja disponibilidade de mapas geológicos da região escolhida, deverão ser realizados trabalhos de cartografia do local com traçado de perfis nas principais direções do projeto (Loureiro, 2008).

Os métodos de prospecção podem ser classificados como: indiretos ou geofísicos, baseados na interpretação de certas medidas físicas; diretos ou mecânicos, através da execução de perfurações ou sondagens do subsolo.

Neste capítulo iremos focar nos métodos diretos, os quais utilizam da extração de amostras dos materiais existentes no subsolo. Este método possui grandes vantagens, uma vez que entra em contato diretamente com o local de execução da obra, possibilitando ainda a realização de ensaios no local e a coleta de amostras para ensaios posteriores. As desvantagens são o seu elevado custo e o fato de se tratar de uma amostragem pontual, carecendo de interpretação na elaboração dos perfis geológico-geotécnicos (Bastos, 1998).

Os principais tipos de métodos diretos para investigação de solos são a prospecção manual e a prospecção mecânica.

4.1 Prospecção Manual

A prospecção manual pode incluir poços, trincheiras ou trados manuais. Estes têm como objetivo expor e permitir a direta observação visual do subsolo, com a possibilidade de amostras indeformadas.

Os poços são aberturas de formato circular ou quadrado realizadas em rochas através de furos de martelete ou explosivos. As dimensões do poço são suficientes para permitir uma observação e avaliação ao longo de suas paredes, a fim de fazer uma descrição detalhada das camadas do subsolo e também, coletar amostras para a execução de ensaios em laboratório (Figura 4.1).

A profundidade do poço é muitas vezes limitada pela presença do lençol freático. É recomendado fazer a descrição específica e detalhada das paredes do poço, bem como a coleta de amostras, toda vez que ocorrer a mudança nas características do material (Chiossi, 1979).

Em projeto de túneis não é usual a abertura de poços de prospecção, contudo pode fazer-se uso deles caso coincidam com a localização de poços de ataque ou ventilação (Loureiro, 2008).

Figura 4-1: Escavação de poços para prospecção geotécnica (Ribeiro, 2014).

As trincheiras são utilizadas para se ter uma exposição contínua do subsolo, ao longo, por exemplo, da seção de uma barragem. São relativamente rasas e são mais úteis para topografia semi-acidentada. Normalmente elas são abertas por meio de escavadeiras (Figura 4.2). Os dados coletados e observados nas trincheiras são colocados em escala vertical, de modo a fornecerem o perfil geológico do local (Chiossi 1979).

Figura 4-2: Método manual através da escavação de trincheiras (Ribeiro, 2014).

Além destes, utilizam-se também como um método de prospecção, os trados manuais. Estes representam um meio simples, econômico e rápido para as investigações preliminares das condições geológicas superficiais. Constam essencialmente de uma broca ligada a uma série de canos e terminando em forma de T (Figura 4.3). Esse método não funciona em zonas de materiais compactados ou endurecidos ou quando o lençol freático é atingido. Neste caso, em camadas arenosas, ocorrem desabamentos das paredes do fundo, e a broca pode ficar presa.

Figura 4-3: Tipos de trados para sondagens (Ribeiro, 2014).

As amostras de sondagem a trado são coletadas a cada metro, à medida que avança o furo, anotando-se as profundidades em que ocorrem mudanças do material. A descrição geológica deve ser feita logo após a conclusão da sondagem, no próprio local ao fim de cada dia, para evitar o ressecamento do material (Figura 4.4).

Figura 4-4: Amostras de sondagens obtidas pela prospecção manual à trado (Ribeiro, 2014).

Os trados manuais atingem com facilidade 10 m de profundidade, podendo alcançar até 30 m. A velocidade de avanço reduz-se consideravelmente com o aumento da profundidade. Furos de até 5m podem ser feitos em menos de duas horas, enquanto são necessários dois dias de trabalho para a perfuração de um furo com 25 m (Chiossi 1979).

As sondagens a trado possuem limitações que restringem bastante seu uso. O trado só funciona para solos coesivos e não consegue atravessar camadas de seixos, mesmo com espessura pequena, da ordem de 5 cm. Um matacão, com diâmetro de 10 cm, é também suficiente para paralisar a sondagem. Não permitem ainda a escavação abaixo do nível d'água, exceto tratando-se de material bem consolidado. No caso de areias inconsolidadas, mesmo acima do nível d'água, a progressão pode se tornar difícil ou impossível, pela não recuperação do material escavado (Chiossi,1979).

4.2 Prospecção Mecânica

A escolha do tipo de trabalho de prospecção mecânica a realizar depende essencialmente do tipo de formação geológica presente. O mais utilizado é a técnica

de sondagem, o método mais importante e utilizado no reconhecimento geotécnico (Loureiro, 2008).

Para determinar quantas sondagens serão feitas e suas localizações devem-se analisar todo o conhecimento adquirido das fases de reconhecimento anteriores, procurando-se amostrar as zonas de maiores incertezas. Distribuir as sondagens de forma equidistante não é uma boa estratégia, exceto nos casos de maciços inteiramente homogêneos (Bastos, 1998).

As sondagens possuem diâmetro e versatilidade; estas podem alcançar profundidades da ordem das centenas de metros, permitem atravessar qualquer tipo de material (confirmando ou não a interpretação geológica de superfície), assim como recolher amostras dos terrenos atravessados. O estudo dos tarolos[2] permite determinar a litologia, o estado de alteração, o grau de fraturação, e os índices de qualidade - % Recuperação e, RQD - do maciço. Estas amostras podem posteriormente ser submetidas a ensaios em laboratório (Loureiro, 2008).

Os principais tipos de sondagem utilizados na prospecção são: Sondagem a Percussão (SPT) e Sondagem rotativa (SR).

A Sondagem a Percussão SPT (Standard Penetration Test) é uma ferramenta de investigação do subsolo que, associada ao ensaio de penetração padronizado (SPT), mede a resistência do solo.

O ensaio consiste na cravação de 45cm, a cada metro de perfuração, do barrilete amostrador através do impacto de um martelo de 65kg, caindo livremente de uma altura de 75cm sobre a composição das hastes (Figura 4.5). Após o término de cada ensaio a composição de hastes é retirada para a coleta da amostra no interior do barrilete amostrador que é substituído pela ferramenta de perfuração (trado ou trepano de lavagem) para continuidade da sondagem até a cota do novo ensaio.

[2] Porção de terreno ou outro material que é obtido por perfuração com sonda de rotação

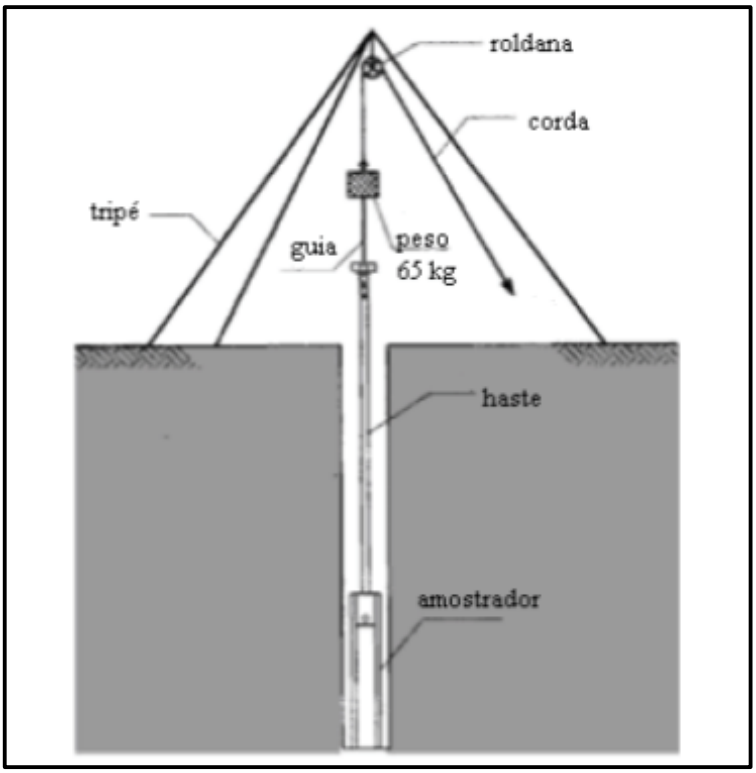


Figura 4-5: Tripé empregado na execução do ensaio SPT (Dantas Neto, 2008).

O resultado do ensaio apresenta a descrição geológica-geotécnica do material perfurado e o nível d'água quando atingido.

Este tipo de sondagem possui baixo custo e de simples execução. É a sondagem mais usada no Brasil para fins de fundações (Ribeiro, 2014).

A Sondagem Rotativa é utilizada para perfuração em rocha. Assim, ao constatar a presença de material impenetrável, a ferramenta de Percussão é dada continuidade a perfuração utilizando Sonda Rotativa, equipamento que permite a extração de amostras de rocha (testemunhos). Os processos podem ser alternados de acordo com a natureza das camadas (solo ou rocha) até atender as necessidades do projeto.

É uma ferramenta obrigatória quando se trata de obra que irá repousar em terreno onde afloram blocos rochosos (denominados de "matacões") apoiados sobre solos cuja capacidade de suporte é desconhecida.

5 MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS À ENGENHARIA E GEOTECNIA

Antes de se iniciar um projeto de engenharia é necessário obter informações do subsolo, sendo muito comum para isso a utilização dos métodos diretos (Capítulo 4). No entanto, estes métodos são restritos e podem não ser suficiente para a investigação desejada.

Diante disso, é necessário recorrer a técnicas indiretas de investigação do subsolo a fim de obter maiores informações e realizar uma obra com mais segurança. É nesse contexto que a geofísica se destaca como um excelente método de investigação utilizando conceitos físicos com aplicação em geologia e geotecnia.

5.1 Introdução

Os métodos geofísicos são caracterizados por serem métodos de investigação indireta do subsolo, isto porque são não-invasivos e se apoiam nas medidas das propriedades físicas extraídas da subsuperfície. Outra característica a ser destacada é a relativa rapidez com que são executados os ensaios de campo.

Outra vantagem dos métodos geofísicos é que eles cobrem amplas áreas dos levantamentos, o que gera uma maior representatividade aos dados. Ao contrário dos métodos convencionais, como sondagens, trincheiras ou amostragens (que são pontuais), perfis ou linhas geofísicas cobrem grandes áreas e, portanto, dão informações que ampliam o conhecimento da área do projeto, tendo como consequência a minimização dos riscos inerentes e das ambiguidades dos modelos interpretativos gerados (Gandolfo e Souza, 2012).

Estes métodos aplicam-se à geotecnia baseados no conceito de que, se duas camadas geotécnicas são distintas, então suas propriedades físicas também são. No entanto, nem sempre essa premissa é válida e, por isso, qualquer método indireto precisa ser coordenado com métodos diretos para se ter uma interpretação correta (Soares, 2009).

A inclusão da geofísica na área de geotecnia se dá, principalmente, na fase de reconhecimento da área de interesse, visando a construção de uma obra civil. Neste caso, o objetivo é a definição de grandes feições, como contatos geológicos, zonas de fratura e profundidade do topo rochoso. Além disso, é possível obter informações de parâmetros geomecânicos como grau de faturamento do maciço

rochoso e resistência de um solo, dentre outros, dependendo das características locais e do método utilizado.

Apesar da geofísica desempenhar um importante papel nos projetos de engenharia, muito comumente as empresas que gerenciam estes projetos desconhecem a diversidade de métodos geofísicos disponíveis no mercado, bem como, o correto emprego e as limitações e potencialidades destas ferramentas de investigação (Gandolfo e Souza, 2012). Em decorrência deste fato, é muito importante a presença de um geofísico para trabalhar de forma conjunta com os engenheiros de uma obra.

As técnicas geofísicas aplicadas neste trabalho serão voltadas à aplicação na área geotécnica, mais especificamente na determinação de instabilidade de encostas e na construção de túneis. Os métodos mais utilizados nesse contexto são a sísmica e os métodos geoelétricos (elétricos e eletromagnéticos) (Figura 5.1).

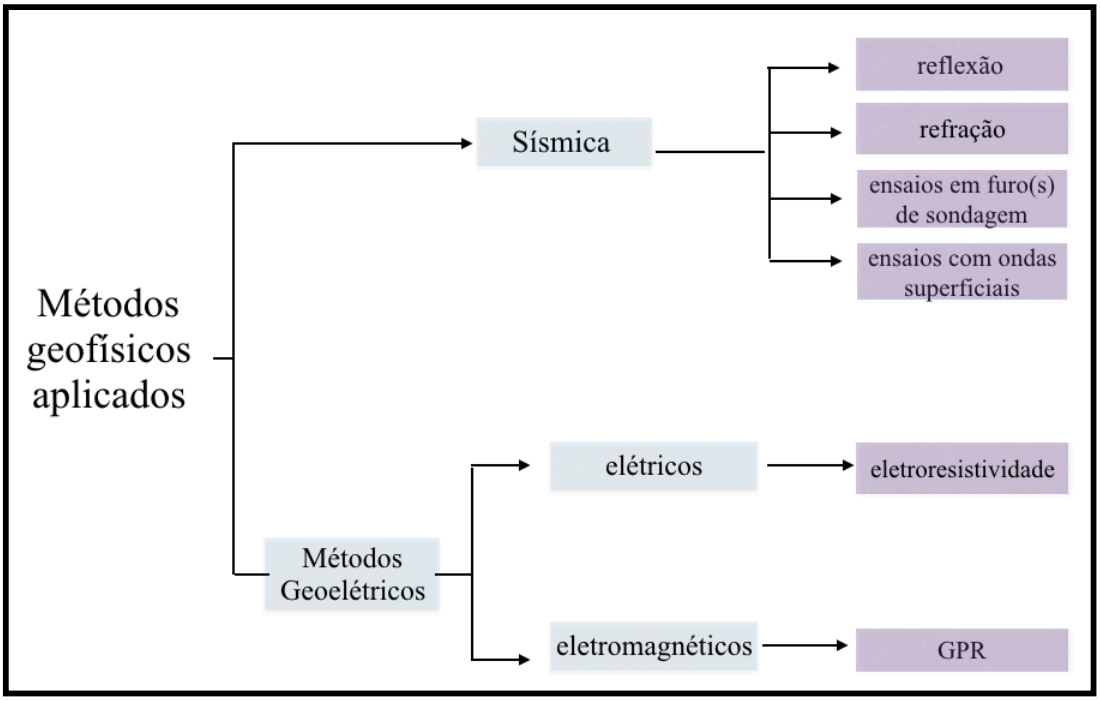


Figura 5-1: Métodos geofísicos utilizados na geotecnia.

5.2 Ensaios em furos de sondagem

Os métodos geofísicos podem ser aplicados em superfície ou, quando disponíveis, em furos de sondagens, caso em que são nomeados como ensaios *crosshole* ou *downhole*. Apesar de serem mais caros, estes ensaios fornecem os

resultados mais precisos e com maior resolução na determinação das velocidades das ondas em profundidade, se comparados com aos ensaios realizados na superfície (refração, reflexão).

O ensaio *downhole* é realizado em locais onde há a disponibilidade de apenas um furo. Este ensaio consiste na geração de ondas sísmicas por uma fonte na superfície do furo, que serão registradas por geofones no interior do mesmo furo (Figura 5.2). É o método geofísico mais utilizado em furos de sondagem devido a sua maior facilidade da geração de energia sísmica na superfície do que no interior do furo. Podem ser realizados utilizando-se tanto a onda P como a onda S (Gandolfo e Souza, 2012).

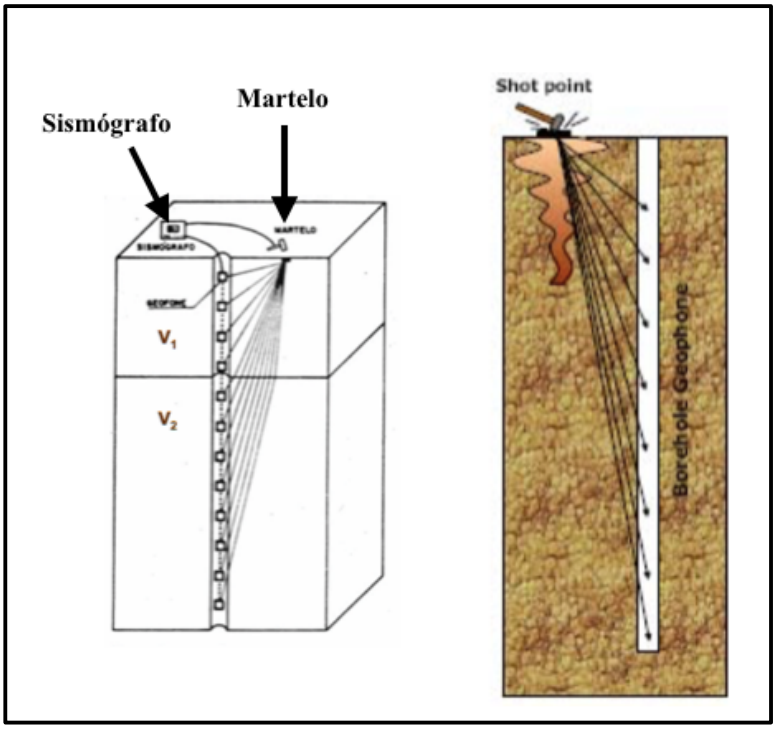


Figura 5-2: Ensaio *downhole* utilizando martelo como fonte geradora de ondas e o sismógrafo para fazer o registro (Modificado de Dourado, 1984 apud IPT, 2012).

O método *crosshole* é um ensaio sísmico entre 2 ou 3 furos (Figura 5.3). Este ensaio consiste na geração de ondas sísmicas P e S em um furo de sondagem (fonte) e seu registro em um ou mais furos adjacentes (sensores), devendo fonte e sensores estarem em um mesmo nível de investigação.

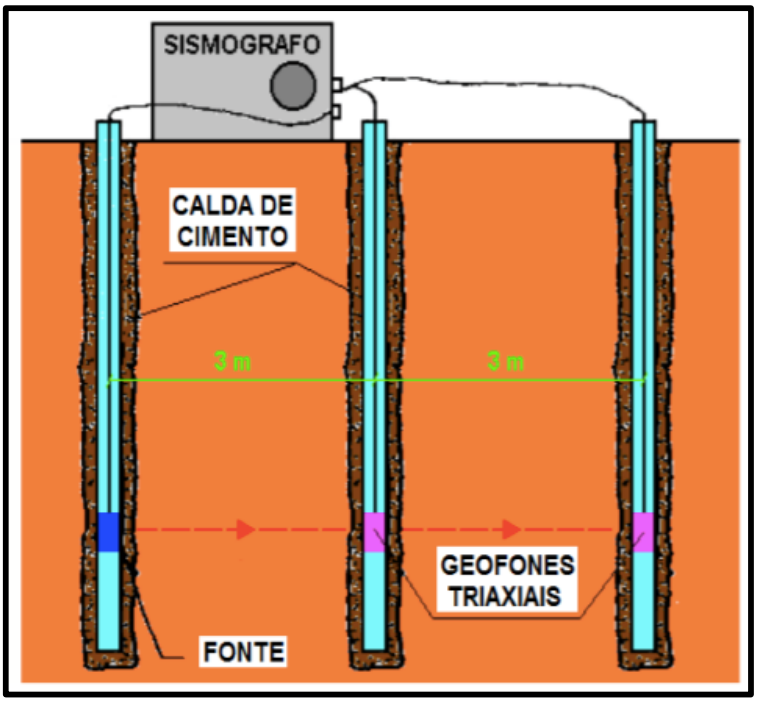


Figura 5-3: Ensaio de *crosshole* utilizando 3 furos (Gandolfo, 2016).

O objetivo deste procedimento é captar as ondas diretas que se propagam em subsuperfície sem que elas sofram os fenômenos de refração e reflexão, pois os mesmos podem mascarar os sinais de interesse (Figura 5.4). Por esse motivo o espaçamento entre os furos deve ser pequeno (aproximadamente 3m). Com os resultados obtidos pode-se calcular os módulos de elasticidade das rochas, para serem utilizados no planejamento de projetos de engenharia.

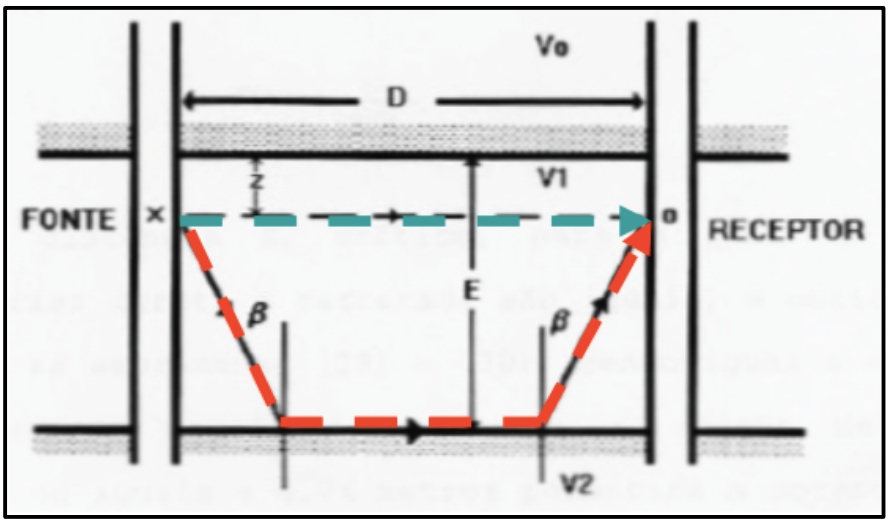


Figura 5-4: Ensaio em *crosshole* para captar ondas diretas entre a fonte e o geofone (seta azul) ao invés de captar as ondas que sofrem reflexão ou refração (seta vermelha) (IPT, 2012).

Com o *crosshole* é possível detectar estruturas importantes, como zonas de falha, grau de fraturação da rocha, continuidade litológica, cavidades e módulo de elasticidade.

Os resultados deste ensaio podem ser correlacionados com as informações das amostras de sondagens que originaram os furos, determinando de forma mais exata a velocidade das ondas sísmicas nos diversos estratos encontrados (Figura 5.5) (Gandolfo e Souza, 2012).

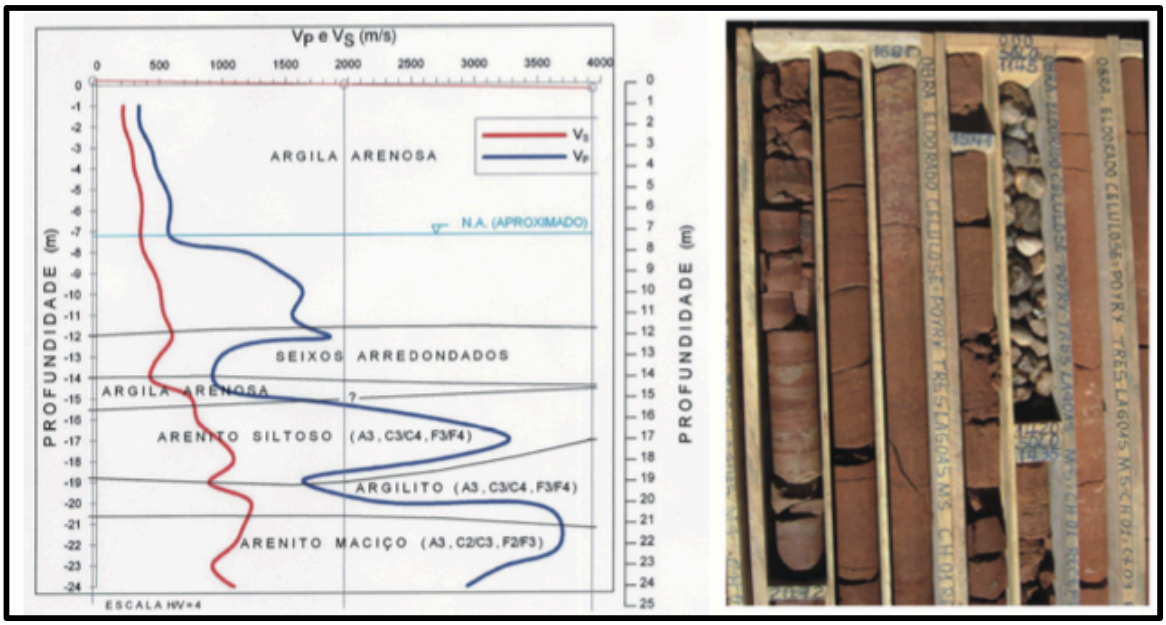


Figura 5-5: Resultados de um ensaio *crosshole* correlacionando com descrições de sondagem em uma área de arenitos (IPT, 2010 apud Gandolfo e Souza, 2012)

Esse ensaio, no entanto, possui limitação em função da pequena distância requerida entre os furos para a realização do procedimento. Além disso, os furos devem ser especialmente preparados (revestidos com PVC, preferencialmente de parede grossa, espaço anelar preenchido e garantia da verticalidade dos furos) (Gandolfo e Souza, 2012).

5.3 Métodos Sísmicos

A sísmica é um dos métodos geofísicos mais utilizados na investigação do ambiente terrestre. Neste tipo de levantamento ondas sísmicas são criadas por uma fonte controlada na superfície que irão se propagar em subsuperfície.

Uma onda sísmica é uma perturbação mecânica do meio "que se propaga sem deslocamento de material, apenas energia" (Soares, 2009). Elas são divididas em dois grupos: as que se propagam pelo meio sólido da Terra (ondas internas) e as que se propagam pela crosta terrestre (ondas de superfície). Segundo Robertson, M. (1986), as ondas internas são divididas em (apud Rocha 2013):

- Ondas de compressão (P), denominadas também de primárias ou longitudinais;
- Ondas de cisalhamento (S), denominadas também de transversal ou secundária;

As ondas P propagam-se por deformação uniaxial, apresentando movimentos rotativos de expansão e compressão no meio, na direção de propagação da onda. As ondas S propagam-se através de um cisalhamento puro, em direção perpendicular à direção de propagação da onda, gerando esforços cisalhantes no meio sólido (Figura 5.6) (Rocha, 2013).

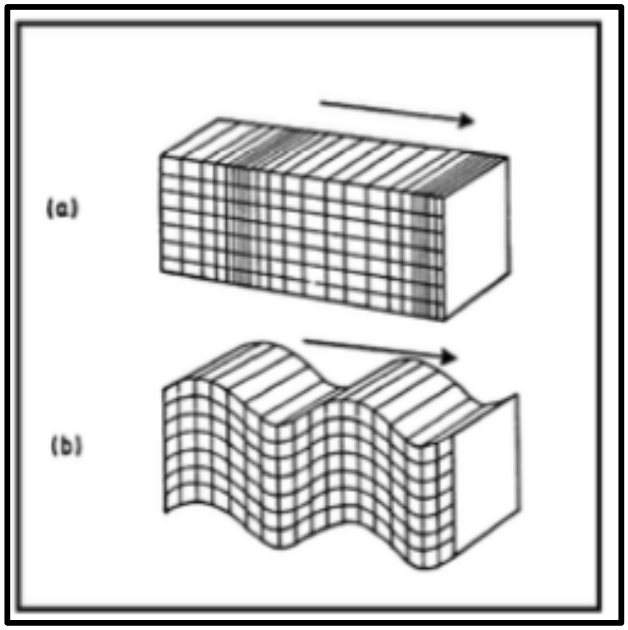


Figura 5-6: Representação das ondas (a) Onda P e (b) Onda S (Rocha, 2013).

A onda utilizada com mais frequência é a onda P. Todavia, observa-se um aumento na tendência no emprego da onda S para estudos geotécnicos, particularmente na engenharia de fundações, devido ao fato que a velocidade de propagação da onda S, ao contrário da onda P, não ser influenciada pela presença

de água no maciço. As ondas S somente se propagam em meios sólidos e podem, com isso, identificar mudanças litológicas de maneira mais eficaz que a onda P (Gandolfo e Souza, 2012). Suas principais características são frequência, amplitude e comprimento de onda.

A frequência da onda utilizada influencia diretamente na resolução e penetração dos métodos sísmicos. Frequências mais altas, que correspondem a comprimentos de onda menores, permitem identificação de camadas menos espessas, mas sofrem maior efeito de atenuação pelos meios geológicos e por isso não alcançam grandes profundidades (Soares, 2009).

Essa característica tem grande implicação no caso de investigações rasas. As camadas mais superficiais, se comparadas com as mais profundas, costumam ser menos espessas, e para identificá-las é necessário utilizar comprimentos de onda menores (que correspondem a frequências mais altas). Ao mesmo tempo, as camadas menos consolidadas tendem a gerar maior atenuação de altas frequências (por oferecerem maior resistência à passagem da onda), dificultando a penetração da onda (Soares, 2009).

O sistema de aquisição sísmica consiste basicamente pela fonte, o dispositivo responsável por gerar a perturbação que dá origem à onda sísmica, e pela distribuição de receptores ao longo da superfície. Os receptores são sensores que detectam o movimento do terreno causado por essas ondas que retornam e, assim, medem os tempos de chegada a diferentes afastamentos em relação à fonte. Esses tempos de percurso podem ser convertidos em valores de profundidade e, a partir daí a distribuição de interfaces geológicas pode ser mapeada.

O sensor que fica acoplado ao solo utilizado para sísmica terrestre é o geofone. A garantia de uma boa instalação desse geofone é uma das causas que geram uma maior demora nas aquisições terrestres (Soares, 2009).

O valor da velocidade das ondas carrega informações sobre o tipo de sedimento ou rocha. Este método é importante não só para informações estruturais, por exemplo, em delinear falhas, mas também para a caracterização física de camadas.

5.3.1 Lei de Snell

Quando uma onda sísmica que se propaga pelo meio geológico encontra camadas com diferentes propriedades elásticas, parte de sua energia será transmitida e parte dela será refletida, ou ainda, caso tenha sido incidida com um certo ângulo, chamado ângulo crítico, será refratada, percorrendo-se ao longo da interface até que retorne à camada sobrejacente. Poderá ocorrer também a absorção de energia sísmica pelo meio (Figura 5.7).

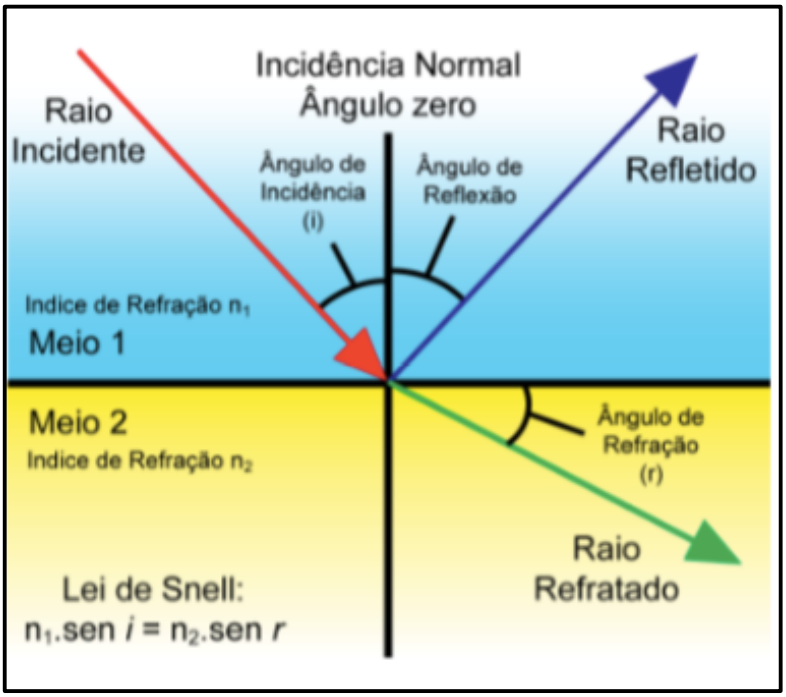


Figura 5-7: Representação do raio incidente na interface de meios de diferentes velocidades e seus respectivos raios refletidos e refratados

Se a incidência for normal não ocorrerá mudança de direção, sendo parte da energia refletida para a camada de origem enquanto outra parte será transmitida para a segunda camada. O total da energia refletida e transmitida será igual à energia do raio incidente, porém sua proporção será determinada pelo contraste de impedância acústica entre as interfaces, sendo que mais energia será refletida quanto maior o contraste (Kearey et al., 2009). Para casos com incidência oblíqua, junto à variação de velocidade, ocorrerá também a mudança de direção no raio refratado definido pela Lei de Snell:

$$\frac{\sin\theta_1}{v_1} = \frac{\sin\theta_2}{v_2} \tag{5.1}$$

onde θ_1 e θ_2 são, respectivamente, os ângulos das ondas incidente e refletida; v_1 e v_2 são, respectivamente, as velocidades da onda P nos meios 1 e 2.

Quando há geração da onda na superfície de um terreno, com existência de uma interface em profundidade com camadas de diferentes propriedades elásticas, se a camada inferior tiver velocidade maior que a da camada superior, existirá um ângulo de incidência tal que o ângulo de refração será de 90º. O ângulo de incidência nesse caso é chamado de ângulo crítico θ_c e é definido por:

$$\theta_c = \sin^{-1}\left({}^{v_1}/_{v_2}\right) \tag{5.2}$$

A impedância acústica Z é uma propriedade elástica dos materiais que representa o produto da densidade (ρ) com a velocidade da onda v se propagando por ela:

$$Z = \rho v \tag{5.3}$$

O coeficiente de reflexão (R) é uma medida numérica do efeito de uma interface sobre a propagação de onda, e é calculado como a razão entre a amplitude A_1 do raio refletido e a amplitude A_0 do raio refratado.

$$R = \frac{A_1}{A_0} \tag{5.4}$$

5.3.2 Sísmica de Reflexão

Dado um modelo geológico simples de duas camadas plano-paralelas limitadas por uma interface horizontal a uma profundidade z, onde as camadas 1 e 2 têm velocidades sísmicas v_1 e v_2, respectivamente, assim como representado na figura 5.8, sendo $v_2 > v_1$. Existem três tipos de trajetória que o raio sísmico pode descrever de uma fonte S até um receptor na superfície a uma distância x de S, são eles: o raio direto, o refletido e o refratado (Boas, 2014).

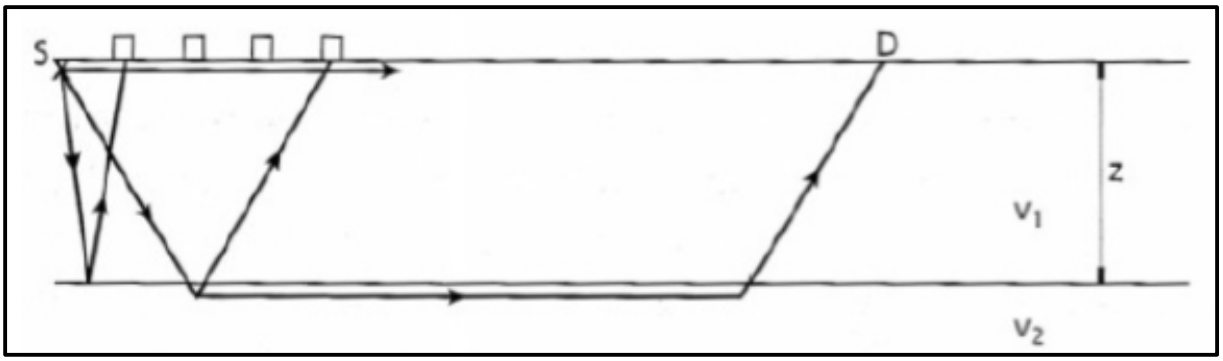


Figura 5-8: Trajetórias dos raios diretos, refletido e refratado em um levantamento sísmico, considerando um meio de duas camadas horizontais

O raio refletido é aquele em que a onda após ser emitida por S percorre a camada 1, atinge a interface entre as camadas e retorna, reflete, até alcançar o receptor.

O levantamento sísmico de reflexão se baseia justamente nesta onda refletida onde, medindo-se o tempo de trânsito da onda, conhecendo a distância fonte-receptor (x) e tendo uma estimativa da velocidade da primeira camada (v_1), pode-se calcular a profundidade da interface. Seguindo o mesmo raciocínio para as camadas mais inferiores, é possível calcular a localização dos refletores, e obter estimativas das velocidades sísmicas nas camadas (Boas, 2014).

Este tipo de levantamento é mais comum em áreas de sequências sedimentares de baixo ângulo, além disso a incidência, muitas vezes, é quase normal, considerando que a profundidade dos refletores geralmente é muito maior do que a distância fonte-receptor. Portanto, a aproximação para ângulos normais é aceitável nos cálculos de velocidade das camadas (Boas, 2014).

Este método é limitado em função da presença de ruídos que, em determinadas situações, podem superar em energia a própria fonte utilizada pelo método, comprometendo significativamente a qualidade dos dados. Para resolver este problema filtros podem ser utilizados no processamento para a retirada de ruídos aleatórios (Soares, 2009).

5.3.3 Sísmica de Refração

O método sísmico de refração é comumente utilizado na engenharia para mapeamento de topo rochoso. Este método utiliza-se da energia sísmica que retorna

à superfície após penetrar e percorrer através do solo e materiais ao longo das trajetórias dos raios refratados (Kearey et al., 2009).

Por meio da identificação da primeira chegada de energia sísmica nos diferentes receptores acoplados ao solo, o método de refração relaciona os tempos de percurso das ondas diretas e refratadas em função da distancia dos receptores à fonte. A partir da análise desses dados são determinadas as velocidades de propagação em cada estrato sísmico na subsuperfície e suas espessuras.

Quanto maior a distância entre fonte e receptor, maior o ângulo de incidência do raio. Por esse fato, a sísmica de refração é indicada para investigações rasas de maior extensão, pois os receptores devem ser instalados a distâncias maiores da fonte para que se colete preferencialmente a onda refratada (Soares, 2009).

O problema do ruído neste tipo de levantamento costuma ser solucionado com a realização de várias aquisições com a fonte e receptores no mesmo ponto, para aumentar a razão sinal/ruído. Como em geral o processo mais demorado é a instalação dos receptores, essa redundância não tem grande impacto sobre o tempo de realização da aquisição (Soares, 2009).

Uma das principais limitações do método é que, para que a onda refratada seja gerada, é necessário que a velocidade das camadas seja crescente com a profundidade. Quando uma camada tem velocidade menor do que a que se encontra acima, ela não será identificada pela sísmica de refração (Soares, 2009).

De forma geral, pode-se dizer que o método de refração é indicado principalmente para observar mudanças laterais na subsuperfície; já o método de reflexão obtém melhores resultados quando o interesse é verificar principalmente mudanças verticais nas propriedades, uma vez que não possui a limitação citada no parágrafo anterior (Soares, 2009).

5.4 O Método da Eletrorresistividade (ER)

Os métodos elétricos de prospecção geofísica utilizam parâmetros elétricos de solos e rochas, como condutividade, resistividade, potencial espontâneo e polarização, para investigar a geologia de subsuperfície. Compreendem o método da resistividade o método da Polarização Induzida (IP), o método do Potencial Espontâneo (SP) e os métodos Eletromagnéticos.

Esses métodos compreendem um grande conjunto de técnicas, destacando-se, como principais na aplicação a túneis, as que avaliam a resistividade aparente dos terrenos (Bastos 1998).

Dentre os métodos elétricos, o de eletrorresistividade terá destaque maior neste trabalho. O método baseia-se na determinação da resistividade elétrica dos materiais, muito útil para detectar presença de água nos maciços rochosos. Este método emprega as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Caminhamento Elétrico (CE).

5.4.1 Princípios Básicos

O método de eletrorresistividade baseia-se na Lei de Ohm, onde uma corrente contínua de intensidade "I" é enviada ao subsolo, através dos eletrodos de corrente A e B na superfície, e onde se mede a diferença de potencial $\Delta V = V_m - V_n$, estabelecida entre os eletrodos M e N (Figura 5.9).

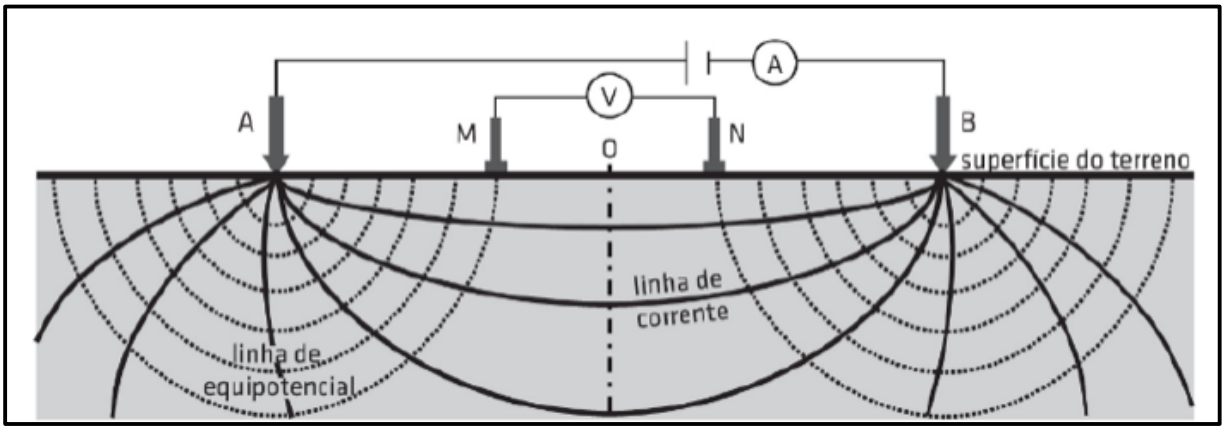


Figura 5-9: Esquema do Método de Eletrorresistividade usualmente utilizado em campo para determinação da diferença de potencial em um solo ao ser injetada uma corrente (Braga, 2016).

A resistividade verdadeira de um subsolo homogêneo e isotrópico, para qualquer configuração de eletrodos utilizada na aquisição dos dados, pode ser calculado pela equação (5.5):

$$\rho = \mathrm{K}\ {}^{\Delta V}/_{I} \qquad (5.5)$$

No entanto, como o subsolo não é homogêneo e nem isotrópico, a resistividade elétrica varia de ponto a ponto, tanto lateralmente como também com o

aumento da profundidade. Consequentemente, essa resistividade obtida aplicando-se a equação válida para meios homogêneos (sendo que é utilizada para meios heterogêneos) é denominada resistividade aparente e sua equação é reescrita da forma (Equação 5.6):

$$\rho_a = \mathrm{K}\ {}^{\Delta V}/_{I} \qquad (5.6)$$

A resistividade aparente, assim como a verdadeira, é expressa com a mesma unidade de medida no (SI), Ohm.m.

O conceito de resistividade aparente é de grande utilidade em aplicações práticas do método porque pode apresentar variações ao longo de uma seção, possibilitando a identificação de anomalias condutivas ou resistivas presentes no local investigado.

5.4.2 Arranjo dos Eletrodos

A variável K presente nas equações 5.5 e 5.6 representa o fator geométrico e depende apenas da distribuição relativa dos eletrodos A, B, M e N na superfície. Os diferentes tipos e estilos de configuração dos eletrodos possuem vantagens, desvantagens e sensibilidades particulares.

Apesar de existirem vários arranjos de eletrodos na bibliografia, serão abordados nesse trabalho as configurações Wenner, Schlumberger e Dipolo-Dipolo, pelo fato de serem mais aplicados à geotecnia.

Arranjo Schlumberger

No arranjo Schlumberger temos uma configuração de quatro eletrodos (tetraeletródica) alinhada e simétrica em relação a um ponto central, com os eletrodos de corrente (A e B) posicionados externamente aos eletrodos de potencial (M e N). Os eletrodos de corrente estão semi-afastados por uma distância “a” e os de corrente por uma distância “b” (Figura 5.10).

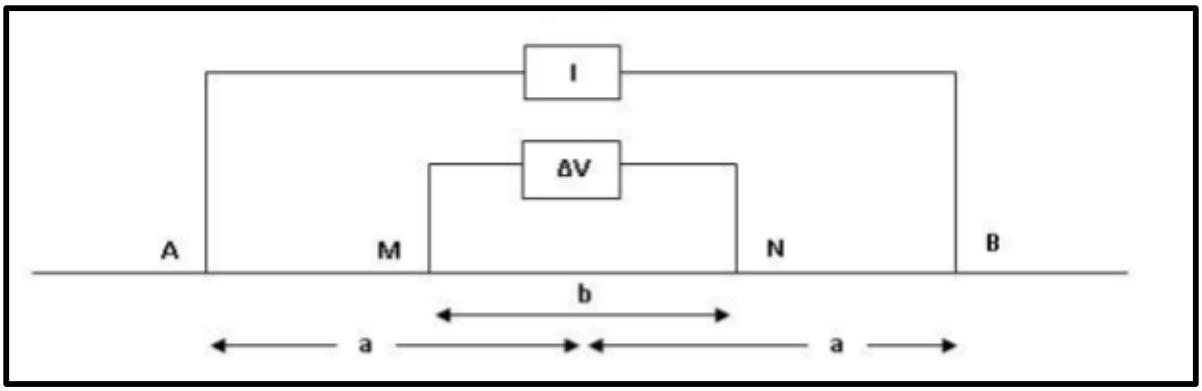


Figura 5-10: Eletrodos de corrente (A e B) e eletrodos de potencial (M e N) alinhados em configuração Schlumberger para determinação da resistividade (Amarante, 2014).

Este arranjo possui como características: praticidade da operação, pois apenas deslocam-se os eletrodos AB (mantendo fixo MN); a qualidade do dado obtido, que é menos sujeito às interferências produzidas por ruídos gerados por fontes artificiais; e é menos susceptível a erros de interpretação em terrenos não homogêneos.

Como consequência das qualidades citadas anteriormente, este arranjo gera bons resultados no mapeamento de estruturas verticais, sendo, desta forma, bastante utilizado em Sondagens Elétricas Verticais (SEV).

A profundidade teórica de investigação do arranjo Schlumberger é Z = R/2 (metros), em que R é a distância entre os eletrodos de corrente A e B.

Arranjo Wenner

O arranjo Wenner utiliza quatro eletrodos dispostos em linha e igualmente espaçados. A menor distância entre dois eletrodos adjacentes é denominada “a”. A profundidade de investigação aumenta com o incremento da abertura entre eletrodos, sempre múltipla de “a”. Desta forma, a distância “na” entre eletrodos AM, MN e BN é sempre mantida constante no decorrer do levantamento (Figura 5.11).

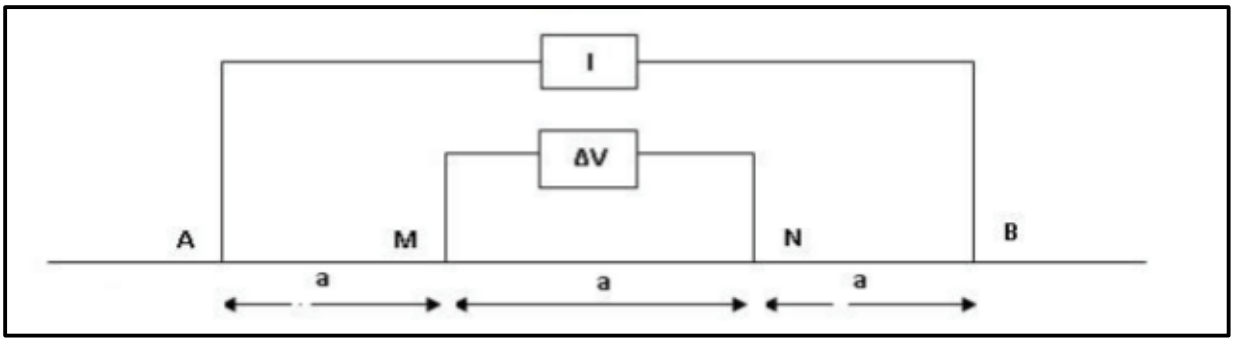


Figura 5-11: Eletrodos de corrente (A e B) e eletrodos de potencial (M e N) alinhados em configuração Wenner para determinação da resistividade (Amarante, 2014).

Este arranjo é muito utilizado em áreas com níveis de ruídos mais elevados porque, entre os arranjos atuais, consegue-se captar o sinal com maior intensidade (Borges, 2007).

Uma desvantagem do arranjo é a rápida perda de cobertura com a profundidade. Através da figura 5.12 pode-se observar que, à medida que se aumenta o espaçamento entre eletrodos (buscando-se maiores profundidades de investigação), a cobertura horizontal em subsuperfície diminui significativamente (Gandolfo, 2007).

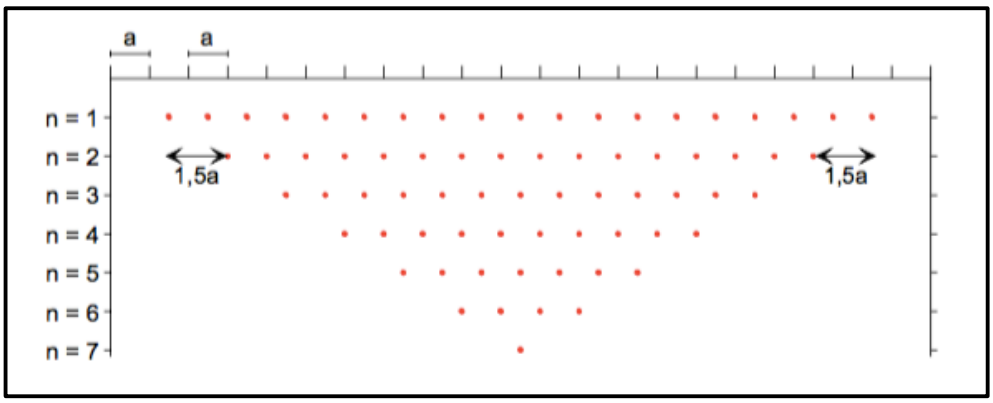


Figura 5-12: Esquema de plotagem do arranjo Wenner mostrando a rápida perda de cobertura com a profundidade (Gandolfo, 2007).

Arranjo Dipolo – Dipolo

Este arranjo é o de uso mais difundido dentre os diversos arranjos existentes, sendo largamente utilizado para diversos fins de geologia de engenharia (Gandolfo, 2007).

Sua configuração consiste nos eletrodos de corrente A e B alinhados com os eletrodos de potencial M e N sobre um mesmo perfil. Os eletrodos de corrente são espaçados com uma distância “a”, bem como os eletrodos de potencial (Figura 5.13).

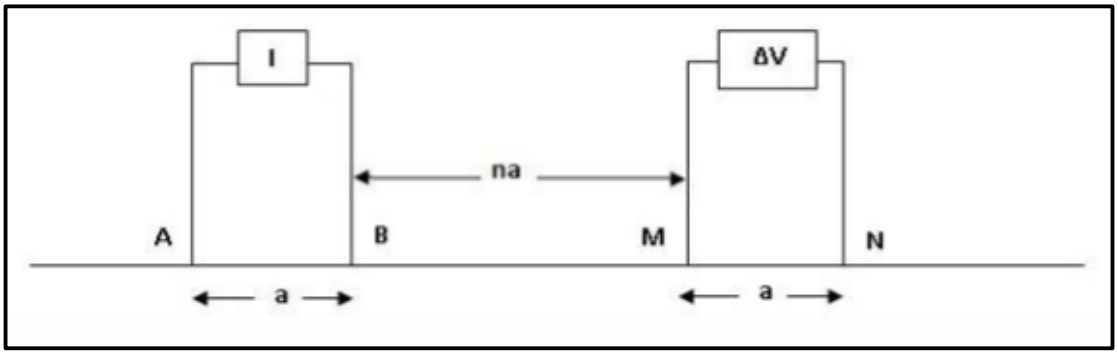


Figura 5-13: Eletrodos de corrente (A e B) e eletrodos de potencial (M e N) alinhados em configuração Dipolo - Dipolo para determinação da resistividade (Amarante, 2014).

Durante todo levantamento o espaçamento “a” entre os dois eletrodos de corrente e potencial permanece fixo, aumentando-se apenas a separação entre eles a um fator “na”. Cada um destes afastamentos corresponde a um nível de investigação em profundidade. De acordo com Gandolfo (2007), quanto maior for este fator “na”, maiores profundidades poderão ser alcançadas. A Figura 5.14 abaixo representa a aquisição com este tipo de arranjo.

A configuração Dipolo-Dipolo gera uma boa resolução lateral (horizontal) de resistividade, mas é relativamente insensível a variações verticais. Uma desvantagem deste arranjo é a perda de sinal quando se torna grande a separação entre os pares de dipolos, ou seja, com o aumento do fator “n” (Borges, 2007).

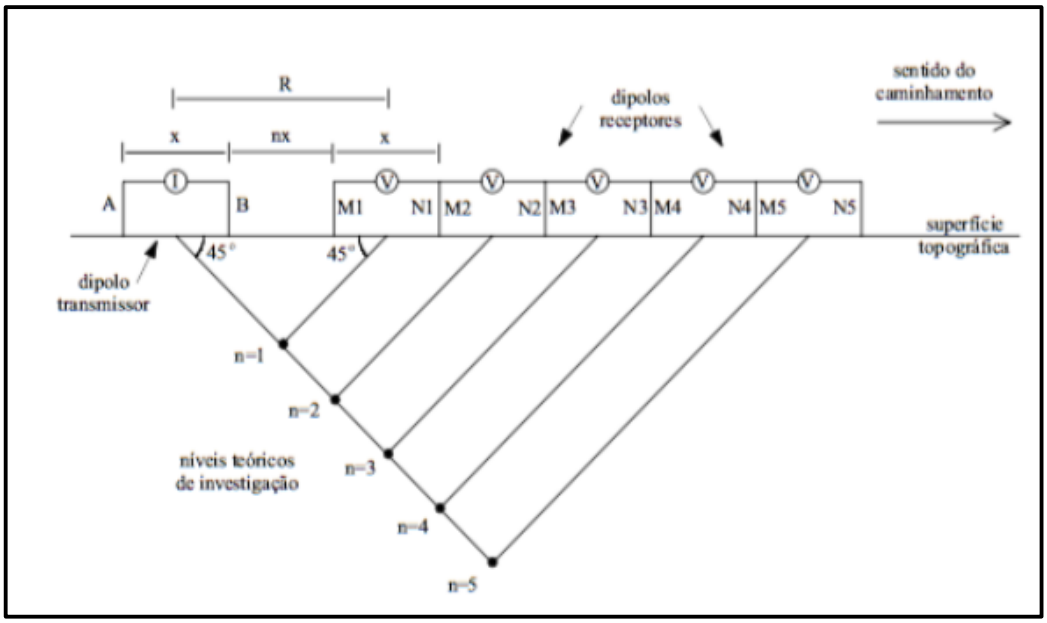


Figura 5-14: Representação de uma aquisição utilizando cinco níveis de investigação através do arranjo Dipolo – Dipolo (Gandolfo, 2007).

5.4.3 Técnicas de campo

As técnicas utilizadas para mapeamento do subsolo utilizando o método de eletrorresistividade podem ser de dois tipos: Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Caminhamento Elétrico (CE) (Figura 5.15). A principal diferença entre eles está na disposição dos eletrodos na superfície do terreno, ou seja, no tipo de arranjo adotado.

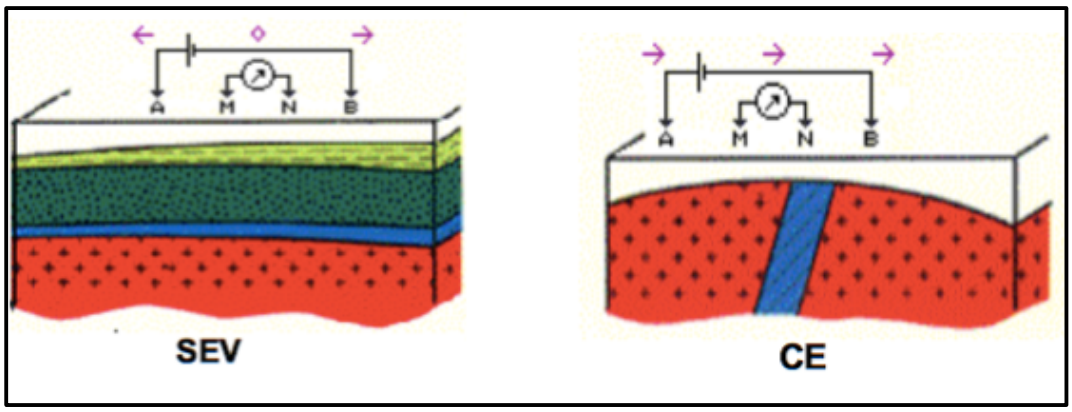


Figura 5-15: Principais técnicas de campo utilizadas para mapeamento do subsolo (IPT, 2012).

5.4.3.1 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

Convencionou-se designar por Sondagem Elétrica Vertical (SEV) a uma sucessão de medidas de um parâmetro geoelétrico (resistividade aparente e/ou cargabilidade aparente) efetuadas em uma superfície de um terreno em estudo, mantendo-se constante a separação dos eletrodos de emissão de corrente (A e B) e os eletrodos de potencial (M e N). Os eletrodos são alinhados na superfície do terreno de forma simétrica e, durante o desenvolvimento do levantamento, a direção do arranjo e o centro do dipolo de potencial permanecem fixos (Figura 5.16).

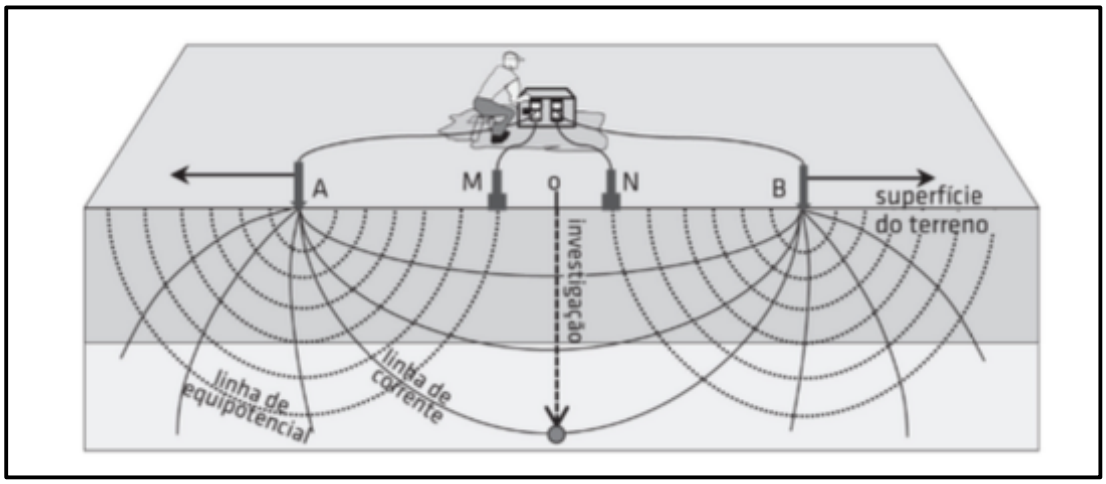


Figura 5-16: Técnica da Sondagem Elétrica Vertical (Braga, 2016).

Aumentando-se sucessivamente as distâncias entre os eletrodos de corrente A e B, o volume total da subsuperfície investigada na medição também aumenta, permitindo alcançar camadas cada vez mais profundas. Desse modo, os resultados apresentam as variações verticais do parâmetro físico escolhido, abaixo de um ponto de interesse na superfície, tal qual uma sondagem convencional.

Para que a aplicação dessa técnica gere um resultado melhor é necessário que as investigações sejam realizadas, preferencialmente, em terrenos compostos por camadas lateralmente homogêneas em relação ao parâmetro físico estudado e limitado por planos paralelos à superfície do terreno, ou seja, um meio estratificado.

O arranjo dos eletrodos adotado no levantamento de campo em geral é o Schulumberger, devido à qualidade das curvas de campo, da facilidade e rapidez na execução e da menor sensibilidade às variações laterais de resistividade e ruídos provocados, por exemplo, por correntes naturais do solo.

A sondagem elétrica vertical apresenta vantagens e desvantagens, assim como qualquer método de investigação. Desta forma, é papel do geofísico levá-las em consideração no momento em que irá programar a investigação de uma área de estudo.

Dentre as vantagens do método, pode-se destacar a precisão satisfatória, custos relativamente reduzidos e versatilidade em termos de profundidade de investigação, a partir da superfície do terreno, sem a necessidade de perfuração do subsolo e grandes impactos ambientais. Além disso, possui pouca sensibilidade a ruídos provocados por instalações elétricas, fios, cabos, entre outros, pois a gama de leitura dos potenciais primários gerados é normalmente superior a esses ruídos.

No que diz respeito às desvantagens dessa técnica, podemos citar a limitação prática dos espaços disponíveis para o desenvolvimento do arranjo AB pois, dependendo dos locais de ensaios, não é possível atingir um espaçamento necessário conforme os objetivos programados; as fugas de corrente no circuito AB devido a problemas de isolamento dos cabos e perda de resolução com a profundidade (camadas poucas espessas não serão identificadas em grandes profundidades).

5.4.3.2 Caminhamento Elétrico (CE)

O Caminhamento Elétrico tem como objetivo principal analisar as variações laterais de resistividade aparente do subsolo, por meio de uma sucessão de medidas da diferença do potencial elétrico estabelecida entre dois eletrodos receptores M e N, devido à injeção de corrente elétrica por dois outros eletrodos de transmissão A e B.

Para que as medidas sejam obtidas, deve-se fixar o espaçamento entre os eletrodos para obtenção das leituras pertinentes a um mesmo nível. Então, todo o arranjo será deslocado para a posição seguinte e são efetuadas as leituras de resistividade aparente correspondentes, continuando esse procedimento até o final do perfil a ser investigado. O arranjo de eletrodos mais utilizado para esta técnica é o dipolo-dipolo.

A técnica é bastante eficaz na identificação de estruturas como contatos litológicos verticais e subverticais, zonas de alteração e/ou fraturamento no interior de maciços rochosos, zonas de falhamentos, presença de intrusões, ou quaisquer

outras características que se apresentem com heterogeneidades laterais (ITP, 2012).

Uma forma de plotagem dos dados bastante utilizada no meio técnico foi introduzida por Hallof (1957). O sistema de plotagem dos parâmetros geoelétricos é efetuado, segundo o autor, considerando como ponto de atribuição das leituras uma projeção de 45° a partir dos centros dos dipolos AB e MN até o ponto médio entre os centros desses dipolos (Figura 5.17).

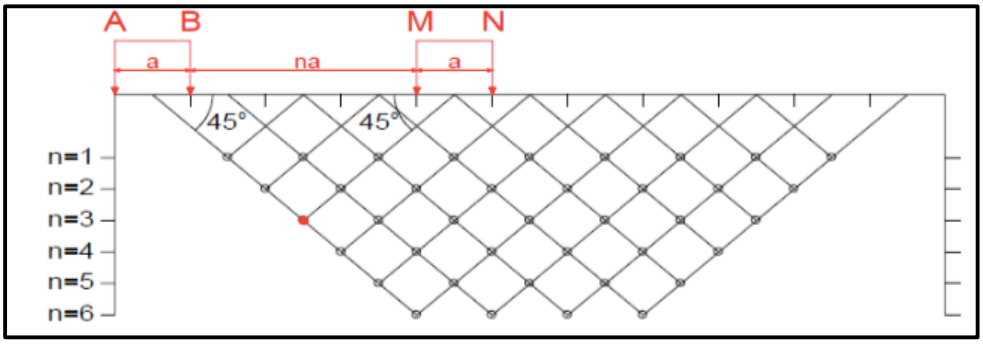


Figura 5-17: Forma de plotagem de dados para construção da seção de resistividade aparente, onde "n" representa os diferentes níveis de investigação (Hallof, 1957).

Após a plotagem de todos os parâmetros geoelétricos obtidos em um perfil, os dados de campo normalmente são apresentados sob a forma de uma seção, onde as resistividades aparentes estão distribuídas espacialmente em subsuperfície. No entanto, deve-se saber que essas distribuições não possuem correspondência com a verdadeira posição e geometria das estruturas em subsuperfície. Por conta disso, chama-se essa forma de apresentar os dados de pseudo-seção de resistividade aparente.

Cada linha horizontal da pseudo-seção está associada a um valor específico de "n" e também a uma "profundidade teórica de investigação", resultando em uma apresentação apenas qualitativa das variações verticais de resistividade aparente (Figura 5.18). Ou seja, neste tipo de plotagem, que será chamada de "convencional", as profundidades representadas não estão relacionadas diretamente a nenhuma profundidade efetiva e a escala vertical, neste caso, não tem nenhum significado preciso (Gandolfo, 2007).

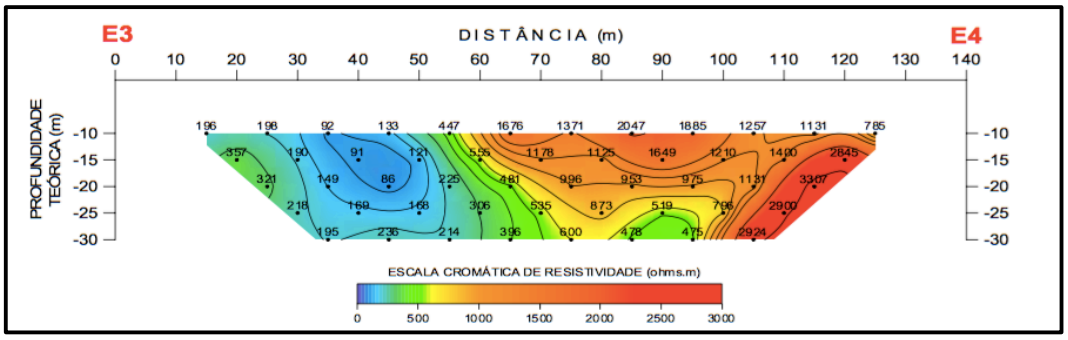


Figura 5-18: Pseudo-Seção de resistividade elétrica aparente (ITP, 2012).

A grande vantagem da utilização do arranjo dipolo-dipolo é o fato de se tratar de um arranjo simétrico, sendo mais fácil a interpretação de uma pseudo-seção, principalmente para se determinar de forma segura a posição de uma anomalia (Gallas 200, apud Xavier e Xavier, 2011).

5.5 O Método GPR

O georadar, ou radar de penetração do solo (GPR - ground penetrating radar), é um método de investigação geofísica utilizando ondas eletromagnéticas de alta frequência (normalmente entre 10 - 1000 MHz).

O GPR é uma técnica não destrutiva e pode, consequentemente, ser aplicada em ambientes urbanos e sensíveis. Possui muitas aplicações geológicas, como imageamento de solo raso e de estruturas de rocha em alta resolução, na localização de canais enterrados e no mapeamento do lençol freático (Kearey et al., 2009).

Este método consiste na emissão de um pulso de energia de alta frequência para o subsolo por intermédio de uma antena transmissora (representada por Tx na figura 5.19), sofrendo reflexões, refrações e difrações, sendo então captado por uma antena receptora (representada por Rx na figura 5.19) (Gandolfo, 2007).

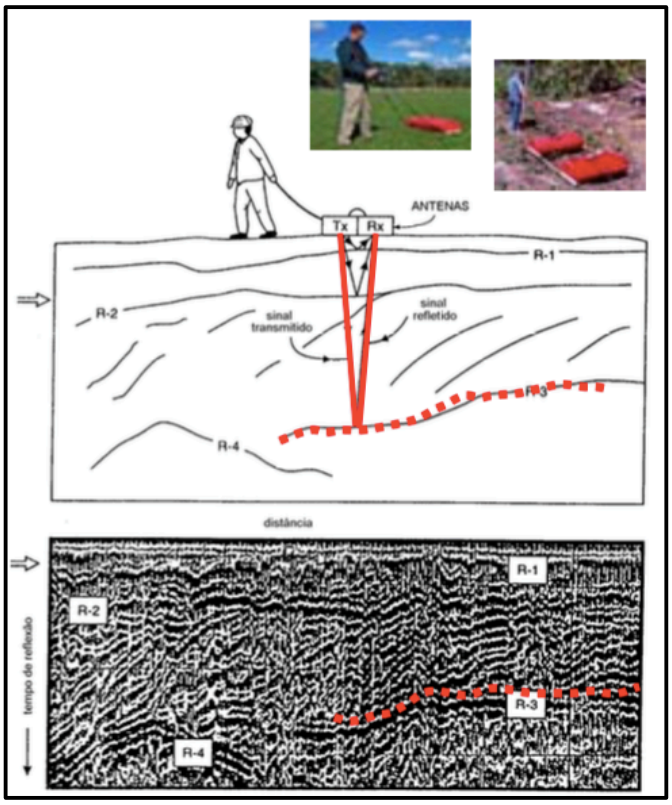


Figura 5-19: Princípio do método de GPR (IPT, 2012)

O pulso recebido pela antena receptora é similar a um trem de ondas, mas difere do trem de ondas transmitido por causa das modificações a ele causadas pela passagem através da subsuperfície. Tais modificações estão relacionadas as mudanças das propriedades elétricas das rochas (Kearey et al., 2009).

As reflexões das ondas de radar ocorrem nas interfaces de materiais com valores distintos de permissividade dielétrica (ε), grandeza normalmente expressa por um número adimensional denominado constante dielétrica (K), que se relaciona com a permissividade pela equação abaixo:

$$\varepsilon = \mathrm{K}.\varepsilon_0 \qquad (5.7)$$

onde ε_0 é a permissividade dielétrica do vácuo.

A conversão das seções em tempo para profundidade pode ser efetuada se for conhecida a velocidade (v) de propagação da onda no meio, dada pela seguinte expressão:

$$v = {}^{c}/_{\sqrt{\mathrm{K}}} \qquad (5.8)$$

onde c é a velocidade da onda eletromagnética no vácuo (=0,3 m/ns).

A frequência é escolhida para a operação de forma a gerar a relação mais vantajosa entre penetração e resolução para um determinado objetivo. Sinais de alta frequência produzem alta resolução, porém baixa penetração, ocorrendo o inverso para sinais de baixa frequência (Gandolfo, 2007).

O conhecimento prévio das características elétricas do terreno a ser investigado pode garantir o sucesso ou não da aplicação do método GPR. Locais eletricamente condutivos, como por exemplo, solos silto-argilosos úmidos/saturados, terão as ondas eletromagnéticas atenuadas. Por outro lado, em terrenos eletricamente resistivos (por exemplo, solos arenosos secos), maiores profundidades podem ser alcançadas pelas ondas (Gandolfo e Souza, 2012). A figura abaixo representa um exemplo de seção obtida pelo método de GPR aplicado em ambiente favorável.

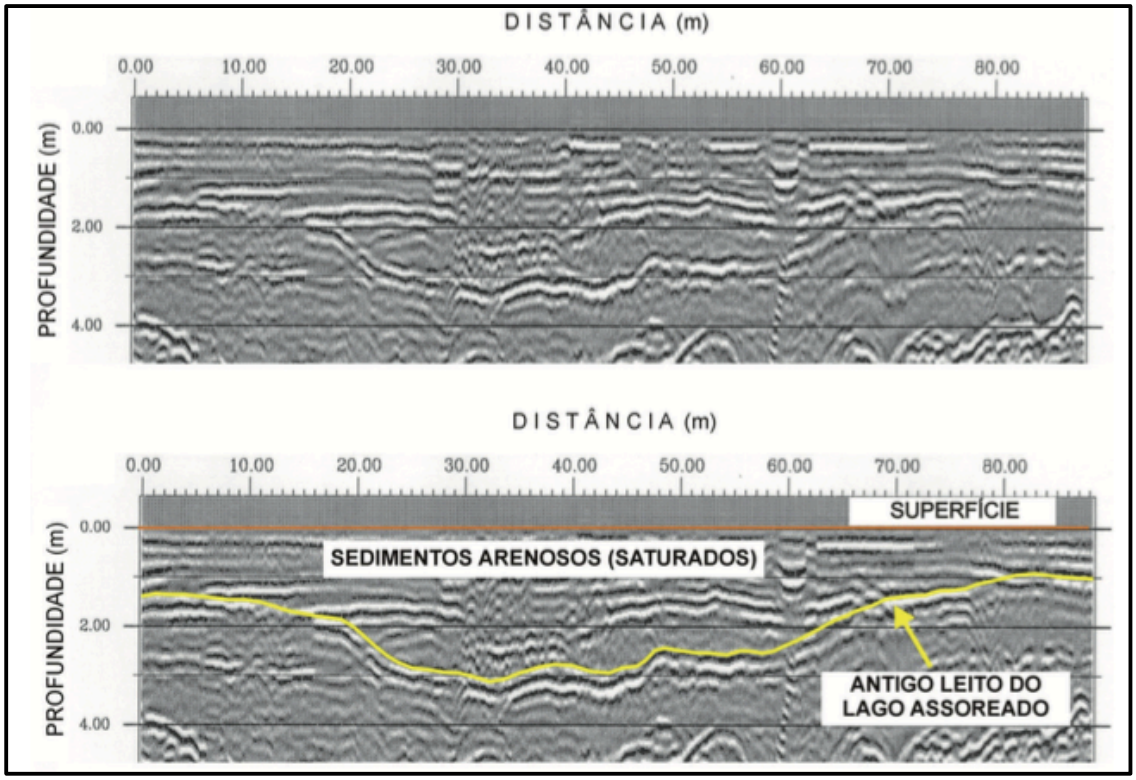


Figura 5-20: Exemplo de uma seção GPR com sua interpretação (abaixo). O refletor assinalado em amarelo corresponde ao fundo da lagoa, preenchida por sedimentos arenosos (IPT, 2006 apud Gandolfo e Souza, 2012).

A presença de água influencia fortemente na constante dielétrica de solos e rochas. A constante dielétrica é bem elevada (K=80) se comparada à dos materiais geológicos secos (geralmente inferior a 10) (Gandolfo, 2007).

A limitação do método de GPR é que este não alcança grandes profundidades devido às suas altas frequências, impossibilitando assim, a determinação do topo do embasamento rochoso. Uma de suas vantagens, no entanto, consiste na praticidade operacional, uma vez que se trata de uma ferramenta geofísica leve e de rápida evolução nas operações de campo.

Outra aplicação onde o GPR apresenta um bom desempenho é na inspeção de estruturas de concreto em obras civis e na investigação de pavimentos. Neste caso, são utilizadas antenas com frequências da ordem de GHz (1000 MHz) (Gandolfo e Souza, 2012).

6 CASOS E EXEMPLOS

A fusão dos métodos diretos com os diferentes métodos indiretos para o estudo do subsolo pode ser fundamental para o desenvolvimento de um modelo adequado de subsuperfície. A determinação do conjunto de estudos necessário deve ser feita caso a caso, dependendo do objetivo da investigação bem como das condições do local a ser estudado.

Neste capítulo serão apresentados casos de estudos geofísicos realizados com fins de obras de engenharia. O primeiro caso foi desenvolvido através de um trabalho de campo que proporcionou uma visita à obra do túnel em Niterói, o segundo caso foi um estudo realizado pelos autores Fernando da Fontoura Xavier e Deisy Schulz Xavier em um congresso de Geologia de Engenharia e Ambiental que ocorreu em São Paulo. Em seguida, o caso 3 que também consiste em um trabalho para fins de engenharia, elaborado pelos autores Otavio Coaracy Brasil Gandolfo e Rubens Vieira ambos do Instituto de Pesquisa e Tecnologia (ITP). Por fim, o caso 4 aborda a investigação de estabilidade de taludes, por Xavier (2008).

6.1 O projeto de túneis

Túnel é definido como uma escavação estreita, alongada e linear, com um comprimento muito superior à sua largura ou altura, destinada a dar passagem a uma via de comunicação, ou a uma canalização (Loureiro, 2008).

Este tipo de construção em maciços rochosos é inevitavelmente dependente das condições geológicas. Sem qualquer estudo prévio quanto à natureza dos solos ou das rochas a atravessar, ocorreram vários fracassos na construção destes, sobretudo pela ocorrência de fenômenos imprevistos, como por exemplo, infiltração de água e desmoronamentos. Os avanços da geotecnia garantem uma maior segurança para realização dessas obras.

Atualmente os túneis correspondem a mais de 90% do volume de escavações subterrâneas em todo o mundo, tendo totalizado uma média anual entre 500 a 1000 km, na década de 90, a que correspondem volumes de terra da ordem dos 20.000 a 40.000 m^3 (Oliveira & Brito, 1998).

6.1.1 Condicionantes Geotécnicos

As obras subterrâneas são empreendimentos complexos pois envolvem escavações em rochas e solos, sendo fundamental os estudos geológicos e geotécnicos detalhados e específicos que, se forem bem elaborados, com adequados programas de prospecção geotécnica e ensaios, muitas situações podem ser previstas e solucionadas, reduzindo-se custos e riscos e aumentando o sucesso da obra.

Como túnel é uma obra linear, é certo que encontra ao longo do seu traçado terrenos com diferentes características geomecânicas que podem condicionar os processos de execução (Figura 6.1). A caracterização geotécnica dos maciços interessados pelo túnel é, portanto, indispensável de modo a conseguir-se um dimensionamento adequado e antecipar potenciais problemas que poderão surgir durante a fase de construção (Correia, 2001).

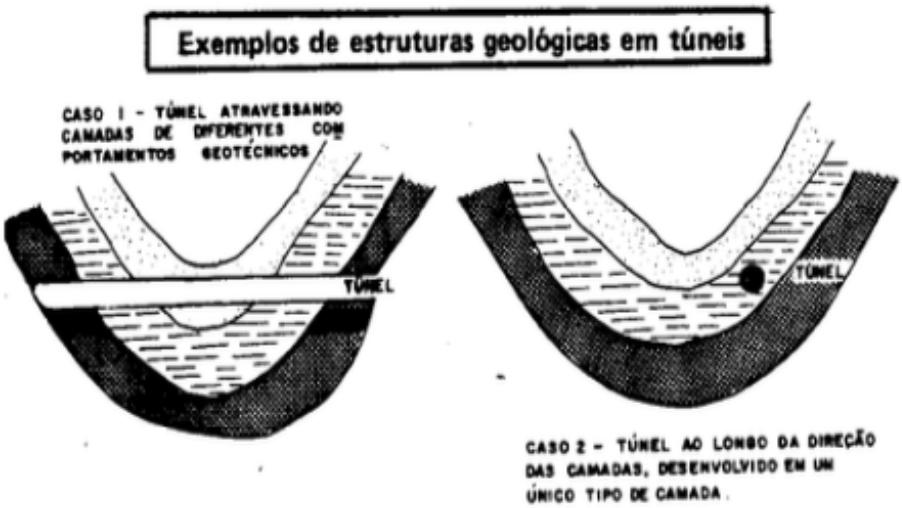


Figura 6-1: Exemplos de estruturas geológicas encontradas em túneis. No lado esquerdo o túnel atravessa camadas de diferentes comportamentos geotécnicos. No lado direito o túnel encontra-se desenvolvido ao longo de um único tipo de camada. (Maragon, 1995).

Na maioria dos casos, o traçado, tamanho e forma da seção do túnel são estabelecidos anteriormente ao reconhecimento geológico, escolha esta governada primeiramente pelos interesses de tráfego e transporte. A tendência para o traçado de um túnel é mantê-lo o mais reto possível, não só por seu percurso menor, mas também pela simplificação da construção e da sua locação topográfica. O encontro

de algumas condições geológicas particularmente ruins, durante o reconhecimento prévio, pode dar lugar a um novo traçado do túnel (Maragon, 1995).

Os estudos geológicos e geotécnicos de túneis são conduzidos em 4 fases distintas, de acordo com Oliveira (1994):

- Estudo prévio e de viabilidade: visam determinar o traçado do túnel, tendo em conta a necessidade de otimizar o seu alinhamento diante dos condicionantes geológicos que poderão ocorrer. Procede-se à recolha de informação geológica (geomorfologia, litologia, estrutura, tectônica, etc.) e geotécnica existente, à análise de fotografias aéreas, ao reconhecimento geológico de superfície e à execução de alguns trabalhos de prospecção.

- Projeto: nesta fase os estudos visam em uma primeira abordagem o zoneamento geotécnico do maciço interessado pela implantação do túnel e a classificação geomecânica das respectivas zonas. Com base nessa informação, procede-se a localização dos emboquilhamentos, a escolha dos métodos de escavação mais adequados e dos suportes primários, e a definição das condições hidráulicas. Os estudos são efetuados através de prospecção geotécnica, utilizando métodos geofísicos, sondagens mecânicas, e ensaios “in-situ” realizados no interior dos furos de sondagens e ensaios de laboratório. Os dados recolhidos e interpretados, permitem obter informações sobre as características geológicas do maciço, as características hidrogeológicas, os parâmetros de resistência e de deformabilidade do maciço e das rochas ou dos solos que o constituem e ainda sobre o estado de tensão “*in-situ*”.

- Construção: É geralmente nesta fase que se completa o projeto do túnel em resultado da integração da informação recolhida no acompanhamento da obra. Essa informação serve para aferir os resultados obtidos na fase de projeto e para lhe fazer eventuais ajustes, que podem ter eventuais reflexos, no dimensionamento do suporte primário e do revestimento definitivo.

- Serviço e exploração: consiste na observação do comportamento da obra a médio e longo prazo.

6.2 Apresentação do Caso 1: Canteiro de Construção para Implantação do BRT Niterói

Para o estudo de caso, foi adotado o túnel Charitas-Cafubá, localizado em Charitas, no município de Niterói. Este túnel está em processo de construção e, portanto, foi uma excelente escolha para que pudesse conhecer e estudar as etapas de uma grande obra de engenharia.

Para a realização desse trabalho de campo foi feito contato com a prefeitura para que estudantes do curso de Engenharia e Geofísica, junto com os professores, pudessem entrar no local da obra. Além disso, a equipe técnica que está supervisionando a obra passou todas as informações necessárias para um maior entendimento sobre como a implementação do túnel está sendo realizada. A visita foi dividida em três etapas: Estudo Prático de Segurança; Estudo Geológico - Perfuração; A visita ao túnel.

6.2.1 Estudo Prático de Segurança

O técnico de segurança do trabalho falou dos treinamentos e orientações para que pudéssemos compreender a cerca dos riscos que existem em um ambiente de obra.

- Respeitar as rotas de fuga e circulação
- Não haver dispersão no momento da visita
- A importância e a exigência do equipamento de proteção individual
- A existência de 4 toques de emergência quando irá ocorrer detonação

6.2.2 Estudo Geológico – Perfuração

O estudo geológico foi feito pela Geóloga Camila Mansur, responsável pelo acompanhamento técnico da obra desde agosto de 2015. Ela realizou uma síntese da evolução da escavação durante esse período.

6.2.2.1 Introdução

O túnel está inserido na obra do BRT, uma obra que irá fazer a ligação dos bairros de Cafubá até Charitas. As obras de escavação dos túneis denominados 7000 e 8000 possuem um total de 1250m e 1234m de comprimento dos túneis 7000 e 8000, respectivamente. Existem dois emboques, o emboque Cafubá e o emboque

Charitas. O emboque realizado no bairro do Cafubá foi muito mais fácil de ser realizado pois pôde-se fazer um canteiro de obra com espaço suficiente para caminhões circularem e para guardar todo material necessário, além da usina de concreto para usar diretamente no túnel e na obra. Já do lado Charitas foi mais complicado pois em cima da região do emboque tiveram que mobilizar mais de 80 famílias e retirá-los de suas casas e o horário de detonação era restrito.

O túnel 8000 teve o encontro das frentes no dia 30 de junho e já está completo em termos de escavação, restando posteriormente a parte de pavimentação. O túnel 7000 ainda faltava 174 metros para se encontrar.

Durante a fase de escavação dos dois túneis foi encontrada uma rocha muito alterada de classe V que não estava prevista no projeto (Figura 6.2). Diante disso, mudanças tiveram que ser realizadas no campo da obra pois o tratamento para esse tipo de rocha deve ser mais intenso e com maior atenção.

As definições geométricas dos túneis são: altura é 7,76 metros, a largura 15 metros e o pilar (largura entre os túneis) é de 8,44 metros. Possui uma cobertura máxima da ordem de 210 metros.

Figura 6-2: Material de rocha muito alterada, de classe V, encontrada no túnel 7000.

6.2.2.2 Método adotado

O método adotado na construção é a N. A. T. M. (New Austrian Tunneling Method) cujo conceito básico é fazer com que o terreno, em vez de atuar somente como carga sobre o revestimento do túnel, atue como um elemento colaborante da resistência da estrutura. Para conseguir isso, a superfície escavada deve ser

imediatamente revestida com material relativamente flexível, que permita a sua deformação e consequentemente a distribuição das tensões ao longo do seu perímetro. Esse revestimento flexível é o concreto projetado, associado a cambotas de aço, ou malhas de aço, ou chumbadores e tirantes, ou fibras de aço ou a combinação de dois ou mais deles.

6.2.2.3 Sequência executiva

Nas escavações dos túneis atuais em rocha ainda predominam as técnicas do método tradicional, denominado mundialmente como D&B Drill and Blast (perfuração e detonação). Esse método é composto por várias etapas que precisam ser executadas ordenadamente, formando um ciclo de escavação bem definido.

Após a definição do plano de fogo, inicia-se a perfuração da frente com a máquina perfuratriz rotopercussiva hidráulicas (jumbo). Essa perfuração depende da classe definida da rocha mapeada. A classe 1 é a rocha sã, a melhor condição para se trabalhar. Nesse caso, o jumbos pode ir nos furos da rocha e furar até 5 metros. Na condição de classe 5, a mais difícil de trabalhar, onde a rocha encontra-se totalmente alterada só é possível avançar 2 metros com o jumbo.

Seguindo o ciclo há a parte do carregamento da frente e a sirene faz o aviso com 4 toques alarmando que a detonação irá acontecer. Uma vez detonado e confirmado que a frente está liberada ocorre a atividade de limpeza de fragmentos de rochas para que o processo possa ser continuado. Quando o avanço da frente é de 5 metros a limpeza é longa e dura entre 2 a 3 horas.

A próxima etapa é prévia ao tratamento e é de extrema importância. Consiste no bate choco mecânico com uma máquina hidráulica que irá bater em toda frente para a remoção de blocos que estejam soltos e que possam cair, principalmente quando o maciço é de classe 3 ou 4, na qual a rocha encontra-se muito fraturada. Este processo dura entre 2 a 3 horas. Sem a parte do tratamento o maciço perde sua estabilidade.

Após isso, tem a verificação do choco com um bate choco manual na qual dois frentistas verificam com um ferro se precisa voltar com a máquina hidráulica para reforçar o choco.

O ciclo de escavação varia e tem duração média de 12 horas, desde a parte de marcar e perfurar com o jumbo e até tratar. Com isso é possível realizar em média dois avanços por dia.

A etapa seguinte consiste no mapeamento geológico que consiste na classificação do maciço rochoso e definição do próximo tratamento a ser aplicado na frente escavada (específico em projeto).

6.2.2.4 Classificação geológica

As características do maciço diferem de local para local, em função da história geológica da região considerada. É necessário evidenciar os atributos do meio rochoso que condicionam o seu comportamento para assim aplicar as solicitações impostas pelo projeto em questão.

Antes da obra começar e para a classificação geológica do local foram realizados estudos, ensaios sísmicos e sondagens que previram predominantemente a classe 1 e 2 para o maciço, com exceção do local da zona de falha que se esperava classe 3 e 4, no máximo. De fato, isso ocorreu em quase todo o seu trajeto, no entanto, encontraram rocha classe 5 na zona de falha no contato do dique com a rocha gnaisse, o que dificultou a obra e a afetou financeiramente. Esta zona de falha consiste em uma anomalia geológica.

Os furos de sondagem foram feitos mais na região dos emboques. O túnel possui cobertura de 210 metros e com essa profundidade o furo de sondagem não fornece a resposta se haveria ou não uma zona de falha.

O método geofísico utilizado para a investigação geológica foi sísmica de refração e previu uma região de falha com rocha alterada, mas não previu que seria de classe 5 da rocha do maciço.

6.2.2.5 Classificação geológica-geotécnica

A classificação geológica engloba:

1. Classificação litológica (gênese da formação geológica) - Baseia-se na mineralogia, estrutura da rocha, textura da rocha e composição química.

Segundo a classificação litológica, a rocha encontrada no maciço foi o gnaisse facoidal composto mineralógicamente por quartzo, biotita e feldspato (Figura 6.3). Essa é a rocha mais encontrada no Rio de Janeiro e predomina na cidade de Niterói nos principais monumentos históricos. Além dessa classificação, foi encontrado em alguns trechos o pegmatito (Figura 6.4).

Figura 6-3: Amostra do gnaisse facoidal encontrado no maciço.

Figura 6-4: Amostra do pegmatito encontrado no maciço.

2. Classificação Geomecânica - Qualidade do maciço rochoso - Baseia-se no estado de alteração e no grau de fraturamento.

Esta classificação é feita em cada avanço e utilizando o Sistema RMR (*rock mass rating*) que determina a relação entre o vão livre do túnel e o tempo de sustentação sem suporte, bem como estima a coesão e o ângulo de atrito para cada classe de maciço. O índice RMR considera 5 parâmetros principais:

- Resistência da rocha (Resistência à compressão simples)
- Condições do fraturamento (espaçamento entre as fraturas)
- Orientação das fraturas
- Efeito da água
- Efeito da posição das descontinuidades relativamente à escavação

Classe I - Maciços de rocha sã, sem alterações, coesos e autoportantes, com ausência de planos (famílias) de fraturas ou diáclases, que, no entanto, poderão ocorrer de forma isolada.

Tabela 6-1: Maciços de rocha Classe I

Peso global	100-81
Classe	I
Descrição	Maciço rochoso muito bom
Tempo médio para aguentar sem suporte	20 anos para 15 metros de vão
Tratamento	Avanço de 3,5 metros a 4,5

Classe II - Maciços de rocha sã, sem alterações, coesos e autoportantes, porém já apresentando pelo menos um plano (família) de diáclases ou de fraturas.

Tabela 6-2: Maciços de rocha Classe II

Peso global	80-61
Classe	II
Descrição	Maciço rochoso bom
Tempo médio para aguentar sem suporte	1 ano para 10 metros de vão
Tratamento	Avanço de 2,5 metros a 3,5

Classe III - Maciços de rocha sã, fraturada, ainda com um certo grau de autossuporte e coesão, porém entrecortado por planos (famílias) de fraturas orientados segundo diferentes direções e mergulhos, podendo ocorrer faixas

milimétricas a centimétricas de alterações nestas fraturas, associadas a maiores concentrações de água subterrânea.

Tabela 6-3: Maciços de rocha Classe III

Peso global	60-41
Classe	III
Descrição	Maciço rochoso razoável
Tempo médio para aguentar sem suporte	1 semana para 5 metros de vão
Tratamento	Avanço de 2,0 metros a 2,5

Classe IV - Maciços de rocha mais fraturada e apresentando faixas intercaladas de rocha alterada, com coesão mais reduzida, autossuporte e estabilidade temporários, quadro que pode se agravar na presença de água subterrânea.

Tabela 6-4: Maciços de rocha Classe IV

Peso global	40-21
Classe	IV
Descrição	Maciço rochoso fraco
Tempo médio para aguentar sem suporte	10 horas para 2,5 metros de vão
Tratamento	Avanço de 2,0 metros a 2,5

Classe V - Maciços formados por solo de alteração (saprólitos) ou rocha totalmente alterada, com pouca ou nenhuma coesão, ausência de autossuporte e estabilidade quando escavados; na presença de água subterrânea estes maciços passarão a ser classificados como de Classe VI.

Tabela 6-5: Maciços de rocha Classe V

Peso global	< 21
Classe	V
Descrição	Maciço rochoso muito fraco
Tempo médio para aguentar sem suporte	30 minutos para 1 metro de vão
Tratamento	Avanço máximo de 2,0 metros

6.2.2.6 Tratamento de acordo com a classe mapeada

1) Aplicação do concreto projetado, espessura determinada em projeto:

O concreto é o elemento fundamental no NATM. A qualidade do concreto projetado depende não só do seu traço, mas com maior preponderância do equipamento lançado e do operador (mangoteiro).

2) Instalação de tirantes:

Na escavação de túneis em rocha, pelo NATM, os tirantes são usados para a estabilização da camada do maciço circundante ao túnel escavado.

3) Instalação de telas metálicas, ou fibras de aço:

Estes são incorporados ao concreto projetado. A vantagem do concreto projetado, principalmente em rochas, é a de permitir acompanhar as irregularidades da superfície escavada mantendo a espessura especificada em projeto.

4) Execução de Enfilagem:

As enfilagens destinam-se a estabilizar o topo da calota antes da escavação, sendo executadas a partir da face de escavação. O tipo mais usual de enfilagen é um tubo de aço de 100 mm cravado sub-horizontalmente no maciço, principalmente ao eixo do túnel.

5) Instalação de Cambotas:

As cambotas são arcos de perfis laminados ou treliças de vergalhões de aço. Dependendo da seção do túnel, as cambotas são fabricadas em segmentos e montadas no local de aplicação por meio de parafusos por motivo de facilidade de manuseio. Como a finalidade das cambotas é suportar as cargas do terreno nas primeiras horas após a escavação, é muito importante que o espaço entre o seu extradorso e o terreno seja encunhado e/ou preenchido com concreto imediatamente após a sua colocação. Em seguida é feito o preenchimento do espaço entre cambotas.

Foram instalados 74 cambotas no túnel 8000 e no túnel 7000 já está com 60 cambotas.

6.2.2.7 Instrumentação

A instrumentação compreende um conjunto de aparelhos e sistemas para a observação e medição do comportamento do maciço durante a fase de escavação e eventualmente durante a vida do túnel. A instrumentação é instalada externa e internamente ao túnel.

Para a instrumentação externa são aplicados os seguintes tipos de instrumentos:

- Marcos de superfície: para controle de recalques
- Tassômetro: para controle de recalques logo acima da calota do túnel
- Pinos para controle de recalques: são aplicados nas edificações vizinhas
- Piezômetro: para controle da pressão hidráulica do maciço
- INA: indicadores de nível d'água para controle do nível freático
- Inclinômetros

6.2.2.8 Conclusão

A obra do túnel, apesar do imprevisto de uma rocha de classe 5 não detectada pelo método geofísico, foi de grande sucesso. As mudanças foram feiras no campo da obra e apenas ocasionou um atraso durante a execução. A parte de escavação e tratamento se encerrou em setembro para o túnel 8000 e em outubro para o 7000, faltando, portanto, a pavimentação.

6.3 Apresentação do Caso 2: Investigação de blocos de rochas e matacões

Vejamos o estudo realizado para a investigação de blocos e matacões em projetos de obra civil em um local onde já tinha sido feita uma campanha de sondagens diretas, porém não trouxeram coerência ou segurança para uma obra do tipo conjunto residencial. A construtora tinha interesse em contratar profissionais para realizarem levantamentos geofísicos e garantir a segurança na sequência do seu projeto.

6.3.1 Introdução

O local do empreendimento localiza-se na Rua Franz Volles, no município de Blumenau, SC, uma área pertencente ao Complexo Granulítico de Santa Catarina com a presença de gnaisses granulíticos leucocráticos com uma granulação bem variável (de fina à grosseira) predominando os tipos finos a médio. A foliação é constituída por alternâncias de bandas milimétricas e centimétricas de material quartzo feldspático e bandas milimétricas de material máfico. São raros os afloramentos nessa região e, quando presentes e inalterados, estão principalmente sob a forma de blocos e matacões.

Os profissionais optaram pela aplicação da Geofísica Elétrica para o mapeamento do subsolo a fim de se investigar a presença de blocos e matacões na região. A escolha do método se deu principalmente pela continuidade – lateralidade que um Caminhamento Elétrico pode trazer de informações do local que, além de precisas, são de rápida execução em campo.

O Estudo Geofísico foi interpretado geologicamente e se concentrou na investigação da extensão e dimensões de bloco (s) e matacão (ões) em local onde surgiram as indefinições frente aos resultados pontuais das sondagens anteriores. Mesmo não sendo alvo principal do estudo determinou-se a espessura do solo, posição da rocha e nível do lençol freático.

6.3.2 Estudo com sondagem e as características geotécnicas

As principais características geotécnicas das rochas pertencentes ao Complexo Granulítico consistem em uma textura maciça a grosseiramente bandada nas porções de textura média, finamente bandada nas porções de textura mais fina, solos espessos, alteração em forma de blocos e matacões, erosão diferencial e escorregamentos do tipo circular ou planar.

Utilizando dados obtidos com sondagens previamente realizados, classificaram os solos como siltico - arenoso com espessuras variáveis, já que o substrato tem forma ondulada. Além disso, há também cobertura por aterro em algumas porções, como também porções de colúvio ao longo da encosta, deixando o material mais grosseiro (bloco e matacão) no pé da mesma.

Foram realizados 20 furos de Sondagens a percussão do tipo SPT para o reconhecimento do subsolo local. Os resultados, no entanto, se mostraram bem

diferentes do esperado e geraram uma situação inusitada para o projetado. Na tabela abaixo pode-se observar que sondagens realizadas nos locais 04 e 05 apresentaram resultados bastante anômalos, se comparado nos outros locais do mesmo terreno.

Tabela 6-6: Dados de Sondagens tipo SPT mostrando a profundidade do impermeável (Xavier e Xavier, 2011)

SPT	Profundidade do impenetrável (m)*	SPT	Profundidade do impenetrável (m)*	SPT	Profundidade do impenetrável (m)*
SP 01	9,60	SP 05 B	1,20	SP 13	10,40
SP 02	10,90	SP 06	13,20	SP 14	9,00
SP 03	13,70	SP 07	15,10	SP 15	7,10
SP 04	2,80	SP 08	7,30	SP 16	4,70
SP 04 A	2,80	SP 09	13,20	SP 17	5,40
SP 04 B	3,90	SP 10	16,00	SP 18	4,90
SP 05	1,60	SP 11	14,00	SP 19	10,60
SP 05 A	2,90	SP 12	9,90	SP 20	5,60

Os dados de SPT 04 e 05 apresentam profundidades semelhantes entre si para o impenetrável, mas muito diferentes dos demais. É diante desse fato que surge a probabilidade de existência de um ou mais blocos de rocha.

6.3.3 Método

Os levantamentos geofísicos foram realizados de forma conjunta com os dados de sondagem diretas do tipo SPT e com o mapa geológico da região confeccionado pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais).

Os estudos geoelétricos de Eletrorresistividade foram realizados utilizando as técnicas de Caminhamento Elétrico (CE) e Sondagem Elétrica Vertical (SEV), de modo a cobrirem a área do provável bloco/matacão, visando determinar a camada de cobertura, a presença de blocos, posição da rocha e nível da água.

As técnicas consistiram em 02 Caminhamentos Elétricos com 100 metros lineares cada, em cruz, com possível bloco como centro e 01 Sondagem Elétrica Vertical que alcançou um máximo de profundidade de 200 metros. O arranjo de campo utilizado foi o dipolo-dipolo para o CE e Schlumberger para a SEV.

O equipamento utilizado foi Resistivímetro, no qual fundamenta-se, basicamente, de uma fonte controlada para emissão de corrente elétrica e

medidores para a corrente e a diferença de potencial gerada. A potência da fonte utilizada no projeto foi de 150 Watts.

Após o primeiro levantamento feito pelo Caminhamento Elétrico foi realizado a inversão geofísica dos dados e posteriormente a interpretação dos mesmos por meio do software RES 2D INV (*Geotomo Software, 2003*) gerando assim as imagens elétricas em 2D.

O método de inversão consiste na determinação de um modelo bidimensional (2-D) de resistividade a partir do conhecimento da geologia local e dos dados obtidos nos levantamentos elétricos de campo.

O software RES 2D INV é projetado para interpolar e interpretar os dados de prospecção geofísica elétrica (sondagem 2D) de resistividade elétrica (condutividade). O modelo 2-D usado neste programa divide a subsuperfície em um número de blocos retangulares, sendo o arranjo dos blocos definido pela distribuição dos dados na pseudo-seção. O programa determina a resistividade dos blocos retangulares que apresentarão uma pseudo-seção de resistividade aparente que ajusta as medidas realizadas (Madrucci et al., 2005).

Os dados de Sondagem Elétrica Vertical foram interpretados quantitativamente através da inversão e do software IX1D v.2. Este software de inversão IX1D determina um modelo 1D de resistividade subterrânea correspondente à resistividade aparente medida.

6.3.4 Resultados obtidos

Os trabalhos de campo executados na região permitiram obter informações quanto à espessura de cobertura, blocos/matacões e profundidade do maciço, através da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e dos Caminhamentos Elétricos (CEs).

As sondagens diretas anteriormente realizadas no local são apresentadas também para comprovar a paridade entre as informações do método direto e do método indireto de investigação.

6.3.4.1 Caminhamento Elétrico - CE

Os Caminhamentos Elétricos, denominados de CE 01 e CE 02 foram realizados perpendiculares. O arranjo de eletrodos utilizado para todos eles foi o dipolo – dipolo com espaçamento de 10 metros e seis (6) níveis de investigação.

Os CEs tiveram como objetivo principal a identificação das camadas geoelétricas e suas distribuições laterais. Nas figuras 6.5 e 6.6 são apresentadas as seções 01 e 02 obtidas pela inversão que ajusta os dados de resistividade aparente medidas em campo.

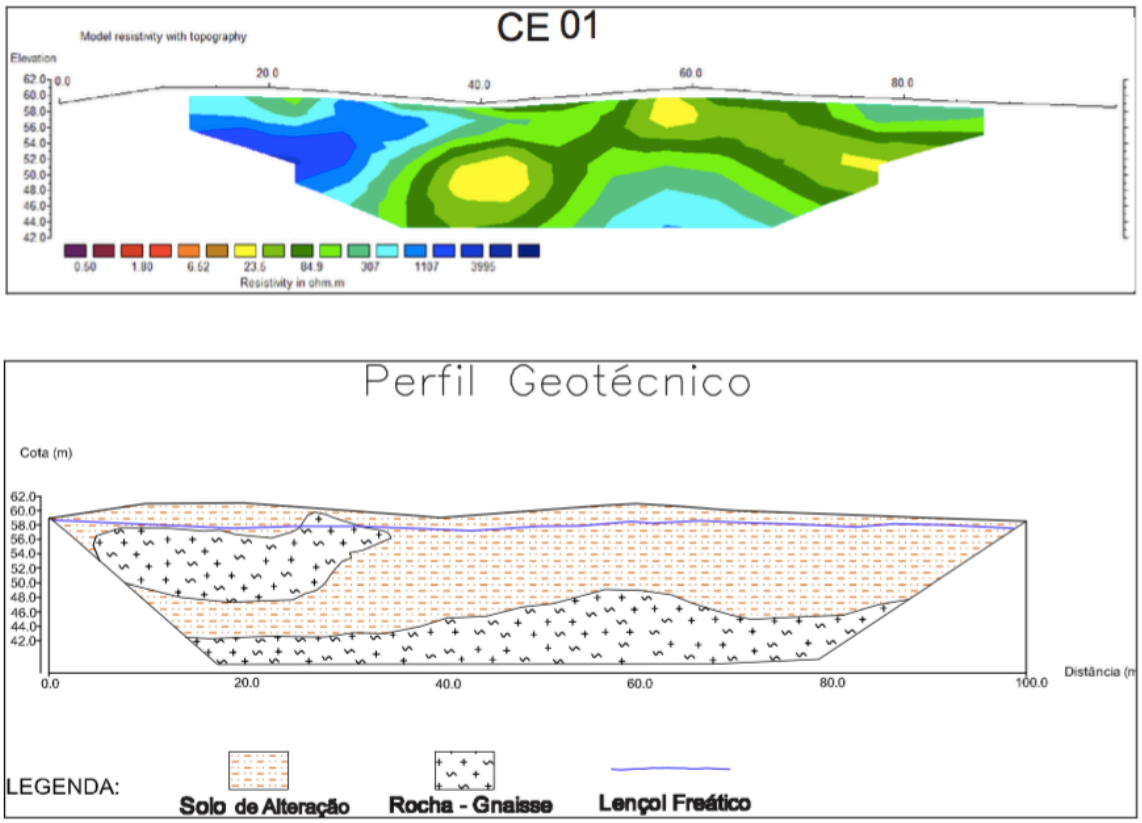


Figura 6-5: Modelo de imagem elétrica e perfil geotécnico para a Seção 01 (Xavier e Xavier, 2011).

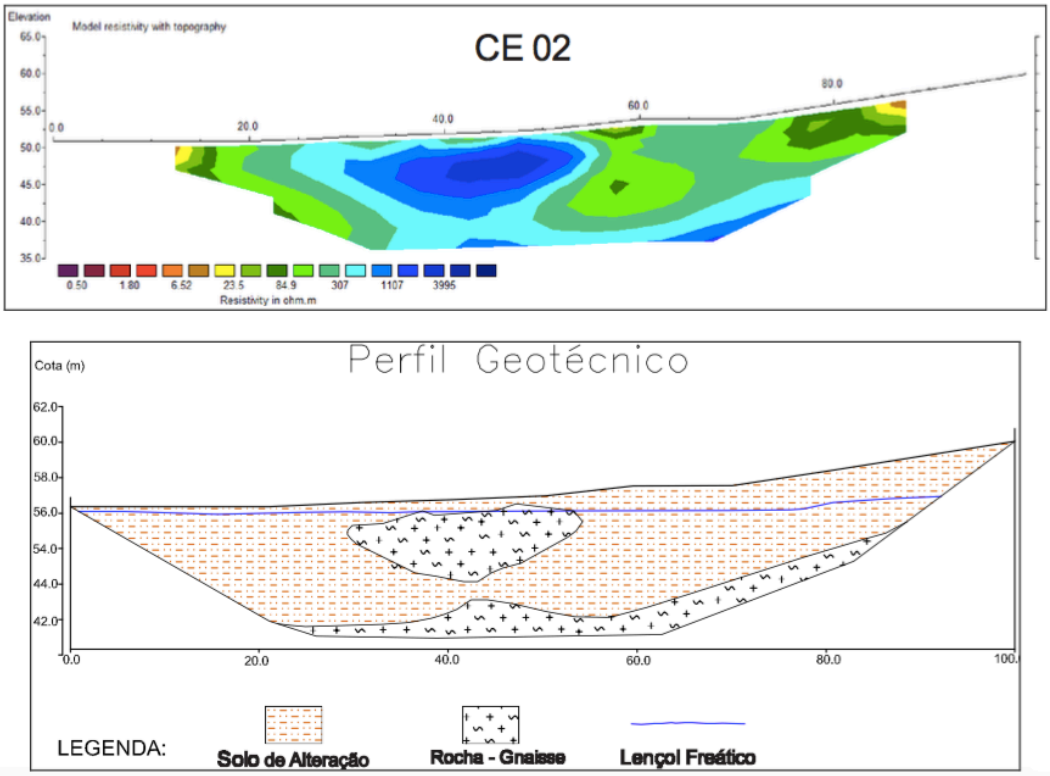


Figura 6-6: Modelo de imagem elétrica e perfil geotécnico para a Seção 02 (Xavier e Xavier, 2011).

Interpretando as imagens elétricas pode-se notar duas camadas geoelétricas principais. A primeira consiste nos materiais de cobertura (aterros + solo de alteração), representado pelos tons de verde. A segunda é o material rochoso alterado/sã, representado pelos tons de azul no modelo. Observa-se que o material rochoso está ocorrendo tanto constituindo o substrato rochoso como por blocos e matacões. Este último tipo de ocorrência de material rochoso (blocos e matacões) está disperso no solo de alteração.

A forma ondulada do matacão apresenta uma superfície de contato com o solo que pode se constituir em plano sujeito a movimentos de massa (por exemplo, escorregamento circular). Os “caminhos” da água subterrânea são identificados pelos baixos valores de resistividade como também pela geometria da imagem, da encosta (côncavo-convexa).

Observa-se também uma linha representando o nível do lençol freático e que foi plotado nas imagens com o auxílio dos dados das sondagens convencionais (SPT, fornecidos pelo contratante) e elétrica vertical - SEV 01.

As seções de resistividade mostraram valores entre 34 e 450 ohm.m, sendo interpretados como o material de cobertura formado predominantemente por argila-

arenosa. Os valores de resistividade entre 450 e 900 ohm.m são resultados do material rochoso alterado/fraturado. Já para a rocha sã os valores resistividade foram os mais elevados, acima de 900 ohm.m.

6.3.4.2 Sondagem Elétrica Vertical – SEV

A finalidade desta técnica foi investigar as espessuras das camadas do subsolo e suas prováveis composições. Utilizando o arranjo Schlumberger, com AB máximo de 200 metros, foi atingida uma profundidade de aproximadamente 50 metros. Foi possível observar também o nível do lençol freático a cerca de 1,2 metros de profundidade.

Após a interpretação dos resultados foram identificadas três camadas geoelétricas: A cobertura, constituída por aterro, com espessura de 1,2 metros; O solo de alteração de 6,2 metros, constituído por um material siltico-arenoso com eventual bloco/matacão; Rocha consolidada encontrada a aproximadamente 17,4 metros, caracterizada por ser um possível gnaisse do Complexo Granulítico de Santa Catarina. A linha representando o nível do lençol freático no item anterior foi observado aqui a aproximadamente 1,2m de profundidade.

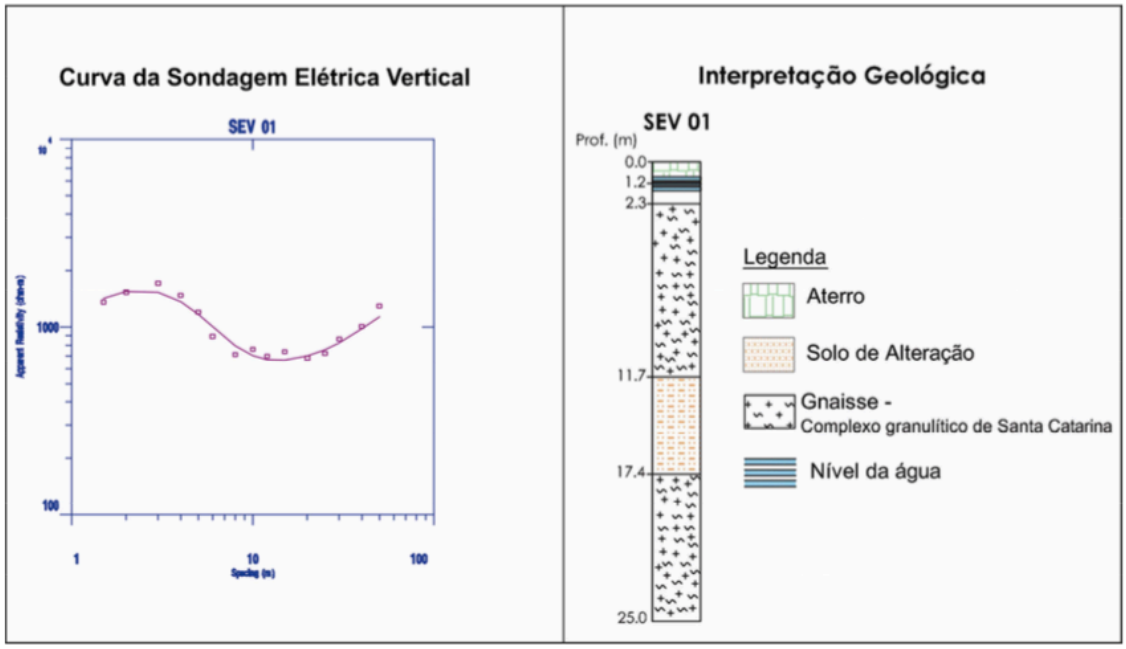


Figura 6-7: Resultado da SEV 01 e sua Interpretação Geológica (Xavier e Xavier, 2011).

O resultado final do conjunto de investigações através do método de Eletrorresistividade permitiu definir com maior precisão as camadas geoelétricas identificadas nos imageamentos elétricos. O trabalho se mostrou eficaz quanto a determinação do bloco/matacão, tanto em extensão como em profundidade, orientando assim as decisões e ações do futuro do projeto geotécnico executivo.

6.4 Apresentação do Caso 3: Investigação de cavidades em subsuperfície para obras rodoviárias

Reis e Júnior (2006) apresentam um estudo utilizando a técnica geofísica do radar de penetração no solo (GPR) para a resolução de problemas de engenharia recorrentes na rodovia BR-414/GO, a principal via de acesso ao norte de Goiás.

6.4.1 Introdução

Durante a fase inicial de pavimentação da Rodovia BR-414/GO foi descoberta uma cavidade no bordo direito no interior de um corte (Figura 6.8). Por meio de conhecimentos geológicos da região, sabe-se que há formações calcárias no local e, por isso, a principal suspeita era que o local tinha uma caverna que poderia provocar uma zona de infiltração e provavelmente o abatimento da região. Isso poderia inviabilizar ou alterar a diretriz da rodovia, ocasionando um grande acréscimo no custo da obra, bem como prejuízo significativo.

Figura 6-8: Cavidade na Rodovia BR-414/GO (Reis e Junior, 2006).

A cavidade foi formada pela dissolução de carbonatos presentes na rocha xistosa aflorante na área e possui uma entrada de aproximadamente dois metros de diâmetro e se estende, em subsuperfície, no sentido da estrada. Com a percolação da água em fraturas e/ou por dissolução kárstica poderia ocorrer um abatimento local da estrada.

Diante disso, trabalhos e estudos foram realizados para o diagnóstico e a solução do problema encontrado. Não foi possível realizar a observação direta da área pois, em aproximadamente 3 metros de profundidade, há um estreitamento na entrada da cavidade, impossibilitando a exploração. Com isso, foram feitas investigações através de sondagens geofísicas com o uso do GPR- Ground Penetrating Radar, com a finalidade de se determinar as dimensões e o comportamento da cavidade.

6.4.2 Método

Os instrumentos utilizados neste trabalho foram os modelos pulse EKKO IV e pulse EKKO 100 da Sensors&Software, fabricado no Canadá. Este equipamento pode operar com frequências de 25, 50, 100 e 200 MHz, dependendo do tipo de estudo a ser realizado. O sistema é leve, modular, totalmente alimentado por baterias e controlado por computador portátil.

A operação foi completamente digital com transferência de dados por cabo de fibra ótica, garantindo alto desempenho e resolução e evitando ruídos produzidos por fios elétricos. A aquisição dos dados foi controlada por computador portátil o qual permitiu a visualização, no campo, das seções ou o pré-processamento antes da interpretação (Figura 6.9).

Figura 6-9: Computador portátil para a aquisição dos dados (Reis e Júnior, 2006).

Foram realizados 9 perfis utilizando GPR, seis paralelos à direção da estrada e três perpendiculares (Figura 6.10).

Primeiramente foi executado um perfil próximo da entrada da caverna (Perfil 1) e em seguida, foram definidas cinco linhas ao longo da estrada (Perfis 2, 3, 4, 5 e 6). Posteriormente, foram executadas três linhas perpendiculares ao sentido da estrada que tiveram como objetivo checar a existência de ramificações da cavidade.

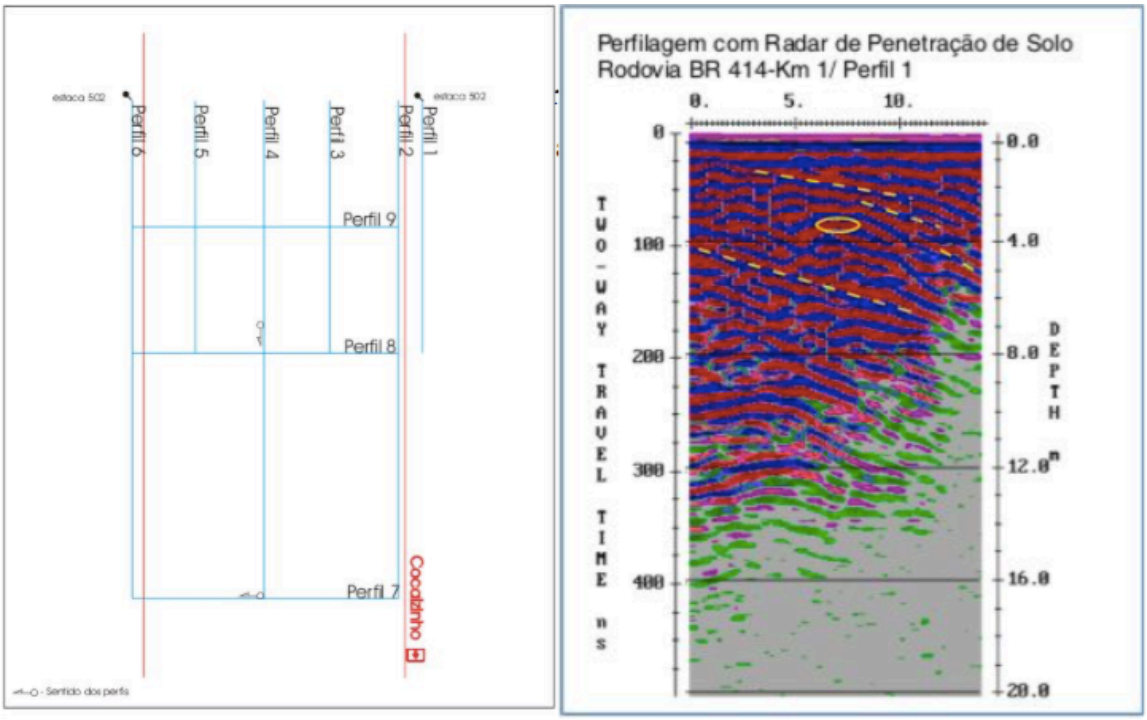


Figura 6-10: Mapa Esquemático da localização dos nove perfis (esquerda) e o resultado do 1º perfil (Reis e Júnior, 2006).

6.4.3 Resultados

O ensaio geofísico mostrou a não existência de uma caverna, sendo possível finalizar a pavimentação com segurança.

O método mostrou-se bastante rápido e eficaz, dispensando a necessidade de furar o solo (com sondagens, etc). Trata-se de um método não-destrutivo, não-invasivo, que evita o inconveniente de obras de sondagens, perfurações ou escavações.

6.5 Apresentação do Caso 4: Investigação de estabilidade de taludes

O referido trabalho realizado por Xavier (2008) se iniciou após um escorregamento de talude em Joinville, SC e tem como objetivo conhecer riscos futuros e ações a serem tomadas a curto, médio e longo prazo. Optaram pelo método da Geofísica Elétrica para o mapeamento do subsolo pelo fato desse método garantir o não agravamento da instabilidade do talude, além de ser de baixo custo e com rapidez na geração dos resultados.

6.5.1 Introdução

A área de estudo está localizada no Distrito Industrial de Joinville, SC e está inserida no contexto geológico de rochas gnáissicas do Complexo Granulítico de Santa Catarina. A base geológica utilizada foi referente ao mapa geológico promovido pela CPRM.

Devido ao processo de urbanização da área, a paisagem original foi modificada por cortes na base da encosta e construção de muro de contenção, mas que não foi suficiente para impedir o movimento de massa (Figura 6.11).

Figura 6-11: Vista do local antes do escorregamento (esquerda) e depois do escorregamento (direita) (Xavier, 2008).

O Estudo Geofísico pretendia definir a espessura do solo, posição da rocha, nível freático, presença de blocos, direção preferencial do fluxo subterrâneo e planos preferenciais de escorregamentos, obtendo informações importantes e confiáveis de como se comporta o subsolo na área de estudo permitindo o melhor direcionamento e programação das fases posteriores, de prevenção e remediação.

6.5.2 Método

Junto com dados de levantamentos já existentes, foram realizados estudos geoelétricos (Método da Eletrorresistividade) utilizando a técnica de Caminhamento Elétrico (CE) e Sondagem Elétrica Vertical (SEV).

O objetivo principal era determinar as camadas de cobertura, presença de blocos, posição da rocha, planos preferenciais para escorregamentos, o nível do lençol freático e a direção preferencial do fluxo subterrâneo.

Foram realizados 1.200m lineares de Caminhamentos Elétricos (distribuídos em 6 CEs) e duas Sondagens Elétricas Verticais (AB máximo de 200m) (Figura 6.12).

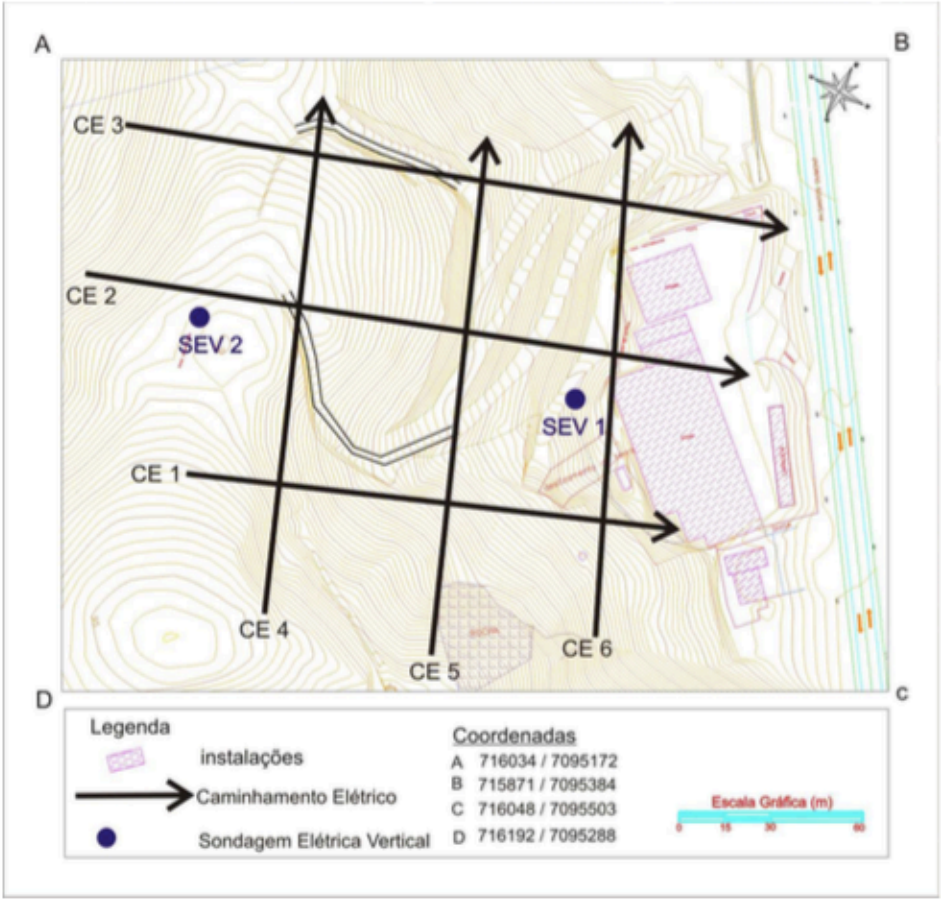


Figura 6-12: Localização das sondagens geofísicas; 6 Caminhamentos Elétricos e 2 Sondagens Elétrica Vertical (Xavier, 2008).

O equipamento utilizado foi o resistivímetro que consiste, basicamente, de uma fonte controlada para emissão de corrente elétrica e medidores para a corrente e a diferença de potencial gerada. A potência da fonte utilizada foi de 150 Watts.

O arranjo de eletrodos utilizado para todos os CEs foi o dipolo – dipolo com espaçamento de 15m e seis (6) níveis de investigação e para a interpretação deles foi utilizado o software RES 2D INV.

As sondagens realizadas (SEV 01 e SEV 02) ocorreu em locais determinados em função dos resultados obtidos no imageamento elétrico 2D dos CEs. Sendo a SEV 01 realizada na base do talude próximo a um dos escorregamentos ocorridos e a SEV 02 foi realizada no topo da encosta. Os dados foram tratados com o software IX 1D, onde foram geradas as curvas e os modelos interpretativos das SEVs.

6.5.3 Resultados Obtidos

As seções de resistividade dos CEs mostraram que os valores de resistividade entre 34 e 450 ohm.m são interpretados como sendo relativo ao material natural predominantemente argilo-arenoso. Já os valores entre 450 e de 900 ohm.m são interpretados como material rochoso alterado/fraturado. Para a rocha sã a resistividade ficou acima dos 900 ohm.m. Para apresentação foi selecionado o modelo CE 01 (Figura 6.13).

A imagem mostra que o substrato rochoso tem forma ondulada. Esta forma ondulada apresenta uma superfície de contato com o solo que pode se constituir em plano sujeito a movimentos de massa (por exemplo, escorregamento circular). Os “caminhos” da água subterrânea são identificados pelos baixos valores de resistividade como também pela geometria da imagem, da encosta (côncavo-convexa) e do substrato rochoso. Também foi possível identificar a presença de diversos blocos e matacões envoltos na massa de solo.

Os dados de SEV indicaram uma diferença na espessura de cobertura, sendo muito mais espessa (22,9m) na SEV 02 do que na SEV 01 (8,2m). Observou-se também a diferença no nível do lençol freático, 3,9m na SEV 01 e 8,2m na SEV 02. Para a interpretação destes dados utilizou-se o modelo de quatro estratos foi o que melhor se ajustou as curvas (Figura 6.14).

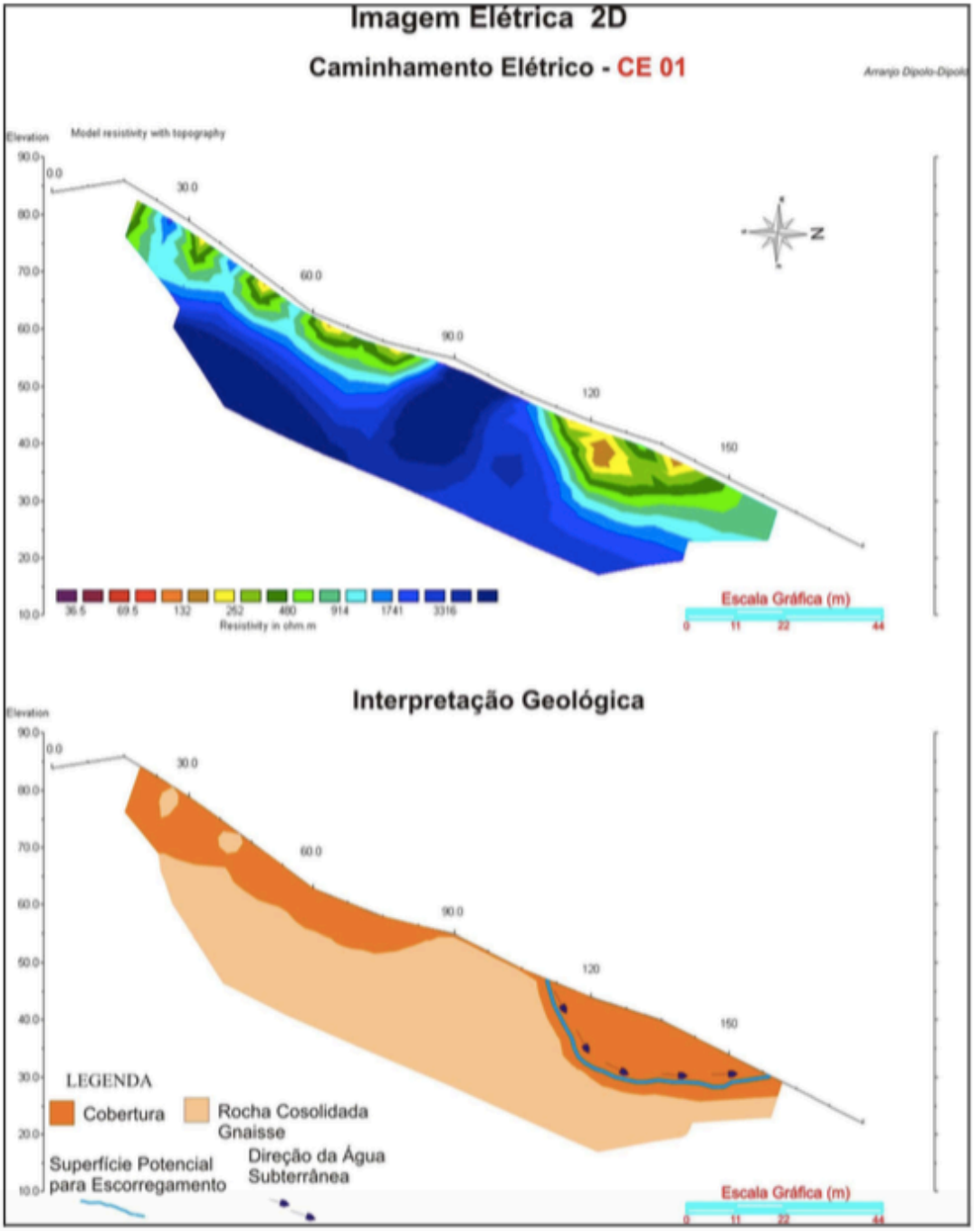
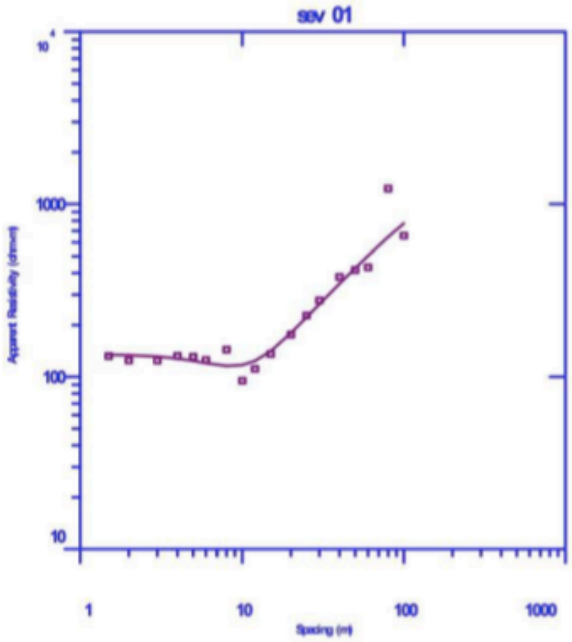


Figura 6-13: Imagem elétrica 2D do Caminhamento Elétrico CE 01 e sua devida interpetação geológica (Xavier, 2008).

Sondagem Elétrica Vertical - SEV 01

Curva de Resistividade



Modelo Geoelétrico Interpretado			
Camada	Espessura (m)	Resistividade (ohm.m)	Interpretações
01	3.9	134.8	Cobertura
02	8.2	52.4	Cobertura
03	20.1	3974.0	Rocha Consolidada
04		466.4	Rocha Fraturada
Coordenadas UTM **716038 / 7095392**			

Figura 6-14: Modelo geoelétrico para a SEV 01 (Xavier, 2008).

6.5.4 Conclusões

O método da Eletrorresistividade, o modelo utilizado e a interpretação geológica se mostraram uma ferramenta eficiente na definição dos principais parâmetros de avaliação dos processos de formação dos movimentos de massa, como por exemplo, espessura de cobertura, perfil contínuo do topo rochoso, presença de blocos e matacões, nível do lençol freático e planos de movimentação. Desta forma colaborou na correta ação preventiva ou em intervenções posteriores, evitando assim, danos maiores na região.

7 CONCLUSÕES

Foram estudados dados relativos a investigações geotécnicas com fins em obras de engenharia, em especial, um túnel, construção de um complexo residencial, obras rodoviárias e instabilidade de talude. Em todos os casos, foi implantado os chamados métodos indiretos de investigação, que, em conjunto com métodos diretos, permitem uma investigação contínua do subsolo, com custos mais baixos e de forma não destrutiva.

A obra do túnel do BRT foi projetada para a construção de dois túneis de comprimento 1234 m e 1250 m, respectivamente. Os túneis 8000 e 7000 tiveram sucesso na escavação e tratamento, apesar das dificuldades em função da presença de rocha muito alterada não prevista durante o estudo prévio da região. O método indireto previa rochas de classe 3 e 4, mas não de classe 5. Diante disso, o problema foi solucionado no próprio campo da obra.

O estudo da investigação de blocos de rochas e matacões utilizou a combinação de duas técnicas geoelétricas de Eletrorresistividade (Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico), com aquisição feita em cruz, bem como algumas sondagens a percussão do tipo SPT. Os métodos indiretos obtiveram bons resultados em conjunto, permitindo o desenvolvimento de um bom modelo de subsuperfície. Além disso, as sondagens diretas anteriormente realizadas no local comprovaram a paridade entre as informações do método direto e do método indireto de investigação.

O uso de outra técnica geofísica para a investigação de cavidades em subsuperfície em obras rodoviárias também se mostrou eficaz e rápida. O levantamento com GPR foi feito em malha, com 9 perfis. Seus resultados mostraram a não existência de uma caverna, sendo possível finalizar a pavimentação com segurança.

O estudo geofísico para a investigação de estabilidade de taludes também utilizou dos métodos geoelétricos (Método da Eletrorresistividade) utilizando a técnica de Caminhamento Elétrico (CE) e Sondagem Elétrica Vertical (SEV). Os resultados mostraram diferentes valores de resistividades que com a interpretação foi possível saber a presença de material predominantemente argilo-arenoso, material rochoso alterado/fraturado e a rocha sã, bem como suas espessuras e

profundidades. Também foi possível identificar o formato do substrato rochoso, os caminhos da água subterrânea e a presença de diversos blocos e matacões envoltos na massa de solo. Mais uma vez a geofísica se mostrou eficiente para a investigação do subsolo.

Os métodos geofísicos são métodos indiretos e, portanto, sua correta interpretação depende da experiência do profissional, bem como da disponibilidade de dados diretos. O uso das sondagens é importante não apenas para que os modelos de subsolo possam ser elaborados, mas para a análise da qualidade da aquisição, por isso é recomendável que algumas sondagens sejam realizadas em conjunto com à aquisição geofísica.

Cada um dos métodos geofísicos aqui abordados possui aplicação na geotecnia, porém cada um possui suas individualidades que os tornam mais indicados para determinada situação. Neste sentido, a obtenção de dados sobre a área a ser investigada é de fundamental importância para a correta escolha do método.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. R., 2010 **– Análise das Causas do Movimento de Massa no Bairro Barreiras**. Macuco, RJ.

AMARANTE, E. M. S., 2014 – **Interpretação de seções de resistividade e cargabilidade aparente.** Trabalho de graduação, Instituto de Geociências, UFBA, Salvador, Brazil.

BASTOS. M. J. N. – **A geotecnia na concepção, projeto e execução de túneis em maciços rochosos.** 1998. Tese de Doutorado. Instituto Superior Técnico.

BERTONI, J. & LOMBARDI, F., 1985 – **Conservação do Solo.** In Conservação do solo. Livroceres.

BOAS, D. B. R. V., 2014 – **Sísmica de reflexão para alvos geotécnicos**. Trabalho de Graduação, Instituto de Geociências, UFBA, Salvador, Brasil.

BORGES, W. R., 2007 – **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente:** Estudo sobre o sítio Controlado do IAG/USP. 260p. Tese de Doutorado – USP – São Paulo.

BRAGA, A. C. D. O., 2016 – **Geofísica apicada: métodos geoelétricos em hidrologia.** Oficina de Textos – São Paulo.

CASTRO, A. L C.., 1998 – **Glossário de defesa civil: estudos de riscos e medicina de desastres.** Brasília: MPO/Departamento de Defesa Civil. 283 p..

CHIOSSI, N. J. **Geologia aplicada à engenharia**. In: Geologia aplicada a engenharia. Gremio Politécnico, 1987.

CORREIA, A. G., 2OO1 – **Caracterização geotécnica de maciços terrosos com vista à modelação de túneis.** In: Curso sobre túneis em meios urbanos. Coimbra.

DANTAS NETO, S. A. – **Fundações e obras de contenção.** Fortaleza, 2008. 134p. Notas de Aula da disciplina Fundações e Obras de Contenção – Curso de Engenharia Civil/UFC.

DeALMEIDA, F. F. M., et al. – **The Precambrian evolution of South American cratonic margin south of the Amazon River**. The South Atlantic Springer US, 1973.

DosREIS, V. E. & JÚNIOR, M. M. S. – **Investigação de cavidades em subsuperfície em obras rodoviárias.** VI Simpósio de Geomorfologia / Regional Conference on Geomorphology (2006).

FERNANDES, N. F. & AMARAL, C. P. – **Movimentos de massa: Uma abordagem geológico-geomorfológico** Apud GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. (org) Geomorfologia e Meio Ambiente. Bertrand, Rio de Janeiro: 1996. P. 123 – 194.

FERRARI, A. L., Da SILVA, A., PENHA, H. M., SUAREZ, B. E. S., De SOUZA, F. C. A. M. F., 2004 – **Projeto Avaliação das Encostas de Niterói com Vista aos Fenômenos de Deslizamentos. Setor 1 (Zonas Centro, Norte e Sul).** Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Niterói, RJ.

FERRARI, A. L., BRENNER, T. L., DALCOMO, M. T. & NUNES, H. R. C., 1982 – **O Pré-Cambriano das folhas Itaboraí, Maricá, Saquarema e Baía de Guanabara.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32, Anais SBG, Vol. 1. Salvador.

GANDOLFO, O. C. B. & SOUZA, L. A. P. – **Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental.** In: Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA), Volume 2.

GANDOLFO, O. C. B. 2016 – **Ensaios crosshole e dilatométrico sísmico (SDMT) na investigação geotécnica de uma área**. In: VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto. SBGF, Rio de Janeiro. Brasil.

GANDOLFO, O. C. B. 2007 – **Um estudo do imageamento geoelétrico na investigação rasa.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências.

GUERRA, G. J. Z., 2011 – **Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos Intemperizados.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

GUIDICINI, G. & NIEBLE, C. M. – **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** São Paulo: Edgar Blruncher, 1993. 194 p. Apud: SESTINI, M. F. Variáveis geomorfológicas no Estudo de Deslizamentos em Caraguatatuba – SP – São José dos Campos, 1999 (Dissertação de Mestrado).

HALLOF, P. G., 1957 – **On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements**. Tese de Doutorado, Cambridge, MIT.

HEILBRON, M., PEDROSA-SOARES, A. C., CAMPOS NETO, M. C., SILVA, L. C. TROUW, R. A. J., JANASI, V. A., 2004 – **Província Mantiqueira**. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., e Brito-Neves, B.B., eds, Livro Geologia do Continente Sul- Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida: São Paulo, Editora Beca, primeira edição, 647p.

HEILBRON, M., VALERIANO, C. M., TASSINARI, C. C. G., ALMEIDA, J., TUPINAMBÁ, M., SIGA, O., & TROUW, R., 2008 – **Correlation of Neoproterozoic terranes between the Ribeira Selt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions**. Geological Society, London, Special Publications.

HUNT, C. B. – **Geology of soils: their evolution, classification and uses**. 344p.

INTERPEX Limited. IX1D v.2. Software; **User's Manual Limited**, Golden, Colorado, U.S.A. Atualização anual.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2012 – **Métodos geofísicos aplicados à engenharia e geotecnia**. Relatório Técnico 171299.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I., 2009 – **Geofísica de Exploração**. Traduzido por Maria Cristina Moreira Coelho, Oficina de Textos. São Paulo.

KONIYAMA, M. et al. – **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos.** 1ª edição. Ed. Curitiba, PR: Organic Trading, 2006.

LOUREIRO, T. H. A. – **Aspectos Geotécnicos na Construção de túneis em áreas urbanas.** Aplicação a terrenos de baixa resistência do miocénico de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa.

MADRUCCI, V.; TAIOLI, F. & ARAUJO, C. C., 2005 – **Análise integrada de dados de Sensoriamento Remoto, Geologia e Geofísica no estudo do Aquífero Fraturado, Lindóia – SP.** In: Revista Brasileira de Geofísica (SBGF) Vol. 23.

MARCELINHO, E. V., 2008 – **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos.** INPE – São José dos Campos.

OLIVEIRA, A. & BRITO, S., 1998 – **Geologia de Engenharia.** ABGE. Oficina de textos.

OLIVEIRA, R., 1994 – **Caracterização geológica e geotécnica dos terrenos interessados por projectos de túneis rodoviários.** In: Seminário sobre Túneis Rodoviários. (pp. 11-27). Lisboa, Instituto Superior Técnico.

PASTORE, E. L., 2009 – **Riscos Geológicos em Obras Civis**. Disponível em: <www.brasilengenharia.com.br>

PRESS, F. et al. – **Para Entender a Terra.** Tradução Rualdo (2006). 4ª edição.

RIBEIRO, D. SANTORO, J. – **Construção de estradas: Estudos Pré-Construtivos.** Bahia, 2014. Notas de Aula da disciplina ENG305 – Curso de Engenharia Civil/UFBA.

ROCHA, P., 2013. – **Emprego do ensaio SPT Sísmico na investigação de solos tropicais.** Dissertação (Mestrado) – USP – Campus de São Carlos – SP.

SANTORO, J. – **Fenômenos erosivos acelerados na região de São Paulo, SP. Estudo da fenomenologia com ênfase geotécnica.** Dissertação (Mestrado), IGCR – UNESP – Campus de Rio Claro – SP, 1991.

SANTORO, J. – **Análise da ocorrência de processos erosivos no município de Campinas (SP), a partir da interação entre susceptibilidade natural à erosão hídrica e o uso do solo.** Dissertação (Mestrado), IGCR – UNESP – Campus de Rio Claro – SP, 2000.

SOARES, C. P. P. – **Métodos Geofísicos em Obras Lineares**. 130 p. Dissertação (Mestrado) – PUC – RIO – Campus do Rio de Janeiro – RJ, 2009.

SILVA, C. T., 2008 – **Modelo para análise de tensões gravitacionais a partir de características Geomecânicas dos Maciços Rochosos.** Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife, Brasil.

TOBIN G. A. & MONTZ B. E. – **Natural hazards: explanation and integration.** Guilford Press, New York, 1997.

TOMINAGA, L. K., SANTORO, J. & DoAMARAL, R., 2009 – **Desastres Naturais: Conhecer para previnir.** In: Instituto Geológico de São Paulo. 1ª edição.

XAVIER, F. F. & VAXIER, D. S., 2011 – **Geofísica Elétrica aplicada a geotecnia para investigação de blocos de rochas e matacões.** 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo.

XAVIER, F. F. & XAVIER, D. S., 2008 – **Geofísica Elétrica aplicada a geotecnia para investigação estabilidade de taludes.** São Paulo.